Diagrama en bloques elemental de un instrumento electrónico analógico

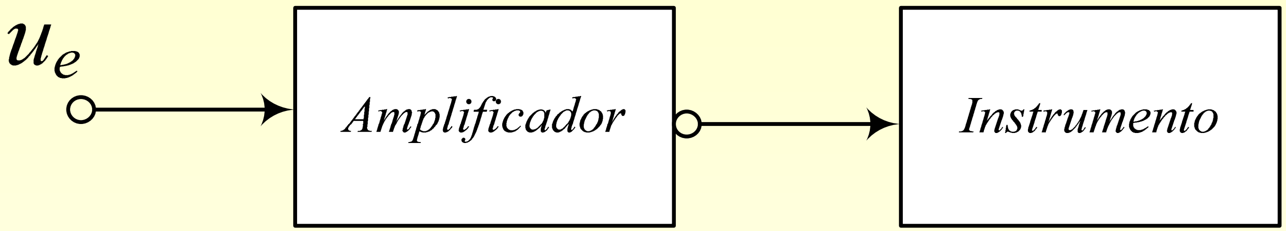
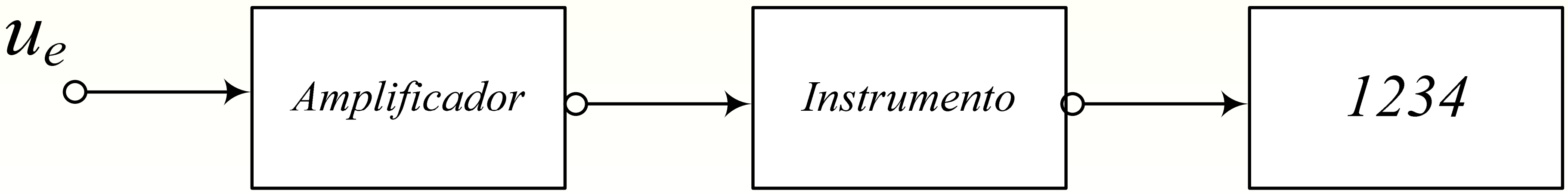


Diagrama en bloques elemental de un Instrumento Digital

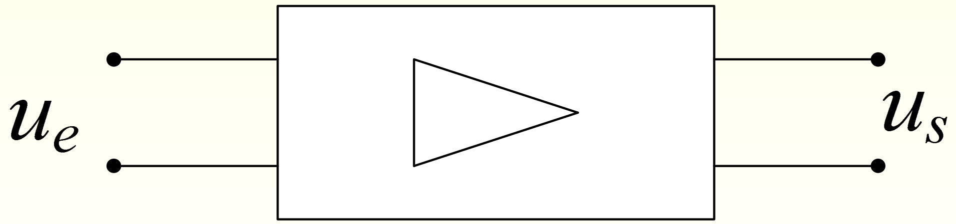


Amplificadores elementales

Primera etapa de un aparato digital $\rightarrow$ Bloque amplificador

(generalmente un amplificador de tensión, que idealmente, debe entregar a su salida una versión magnificada de la tensión de entrada, independientemente del valor de las resistencias de carga y fuente)

Amplificador elemental:



$$A_u = \frac{u_s}{u_e}$$ *Ganancia de lazo abierto*

Algunos inconvenientes de la amplificación de lazo abierto

- La ganancia cambia con el dispositivo y puede no ser estable (alinealidad).

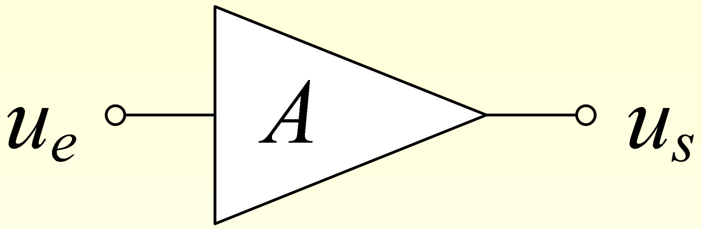
- La ganancia depende fuertemente de magnitudes de influencia como la temperatura.

- Dispositivos de un mismo tipo pueden presentar diferencias de ganancia.

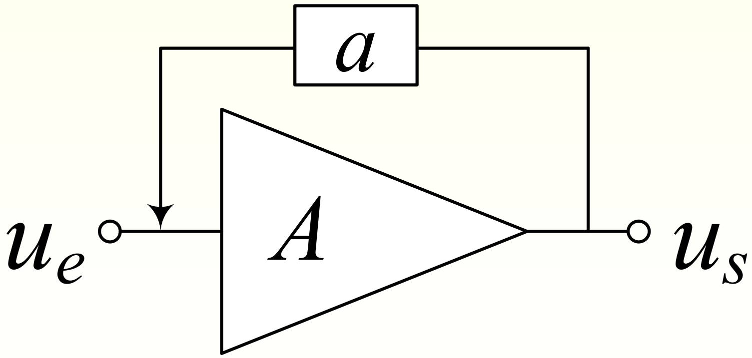
Solución propuesta $\rightarrow$ ***Realimentar***

Amplificadores Realimentados

En un circuito realimentado, se vincula la salida con la entrada:

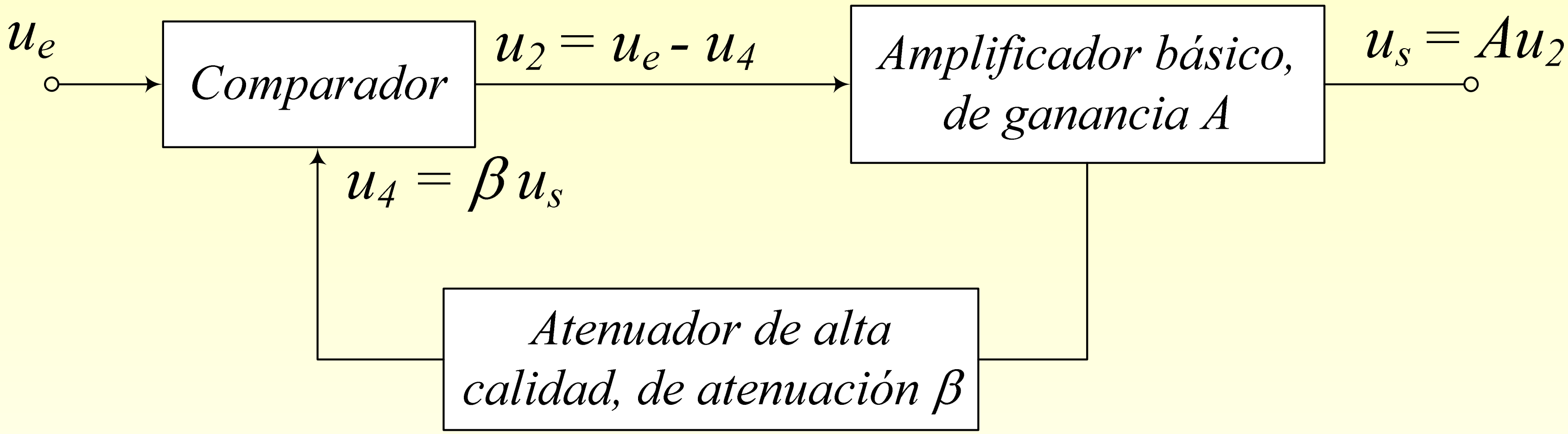


Lazo abierto (elemental)



Lazo cerrado (elemental)

Ganancia de un circuito con realimentación



A: ganancia de lazo abierto (muy alta)

β: fracción de u_s que se mezcla con u_e en el comparador (se supone que no influye sobre la entrada)

$$u_s = A\, u_2$$

$$u_e = u_2 (1 + \beta A) \quad \Rightarrow \quad A_f = \frac{u_s}{u_e} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

Ganancia de lazo cerrado
(feedback)

Algunas ventajas de un circuito con realimentación

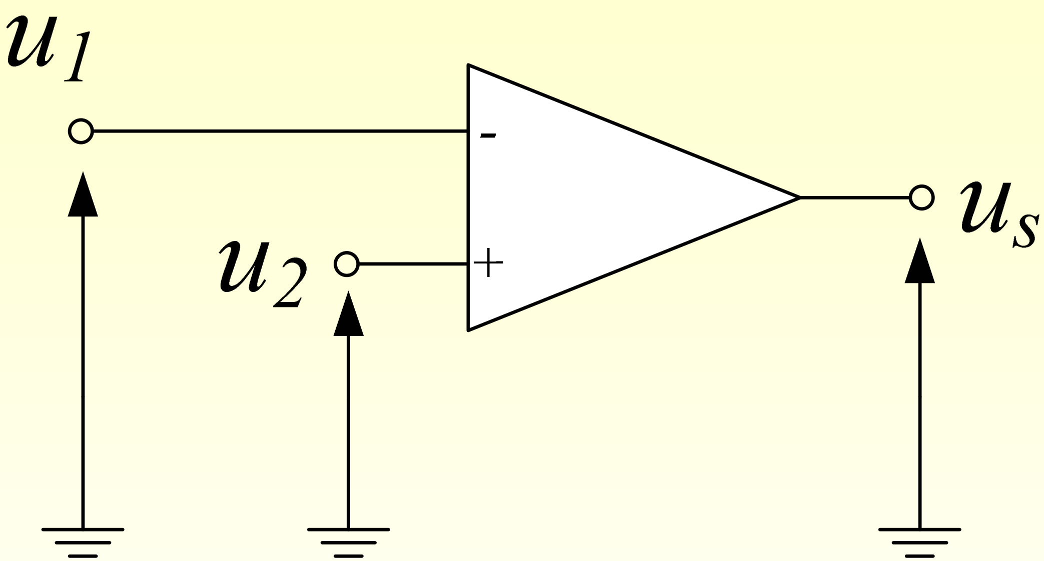
$$A_f = \frac{u_s}{u_e} = \frac{A}{1+\beta A} \qquad \Rightarrow \qquad \lim_{A\to\infty} A_f = \frac{1}{\beta}$$

Si la ganancia de lazo abierto A del amplificador es muy grande, la de lazo cerrado depende sólo de la red de realimentación, que pueden ser muy bien conocida, con grados de exactitud superiores a los de los elementos activos que constituyen el amplificador.

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{1}{1+\beta A}\,\frac{\Delta A}{A}$$

Una variación porcentual de la ganancia del amplificador básico ΔA queda reducida en un factor $1+\beta A$, factor que siempre es mayor que la unidad cuando tratamos con realimentación negativa.

Amplificadores Operacionales



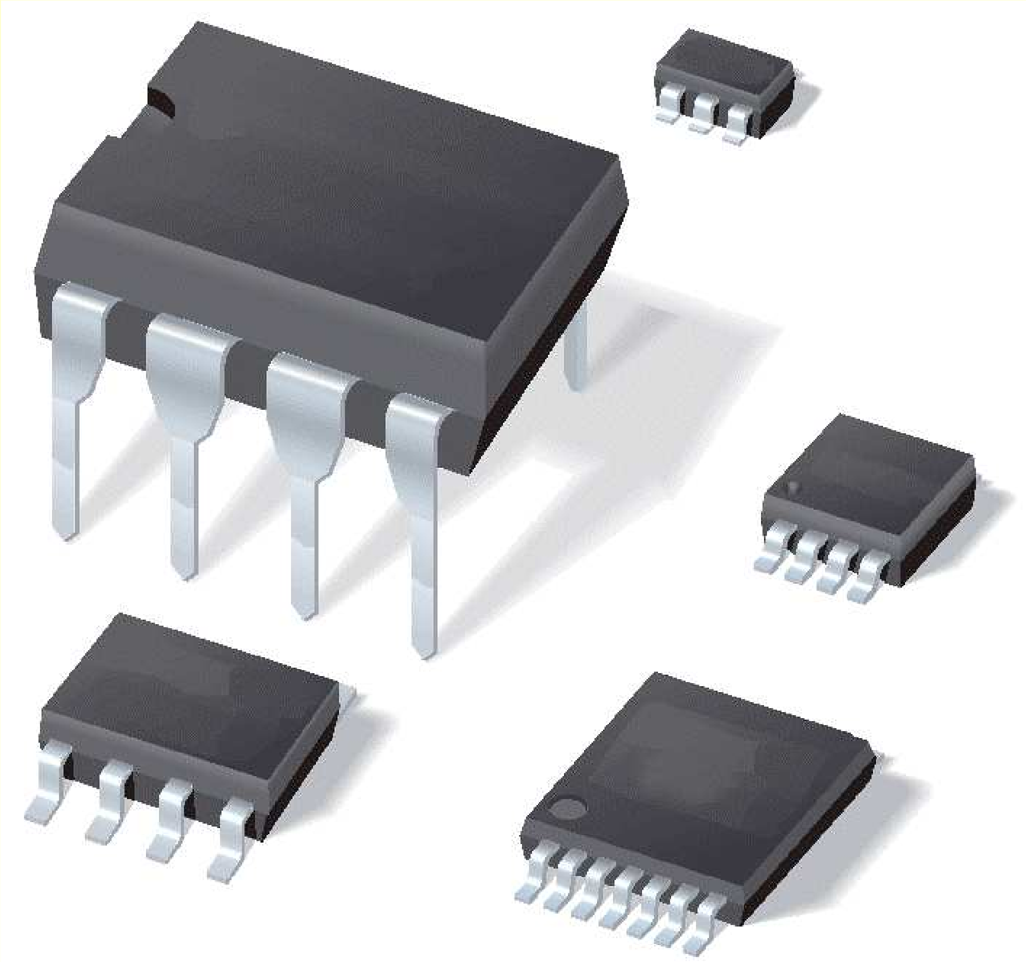
Representación típica

A (ganancia en CC): 10^5 ... 10^7...

Z de entrada: ...10^5 ... 10^6... Ω

Z de salida: ...10...10^2... Ω

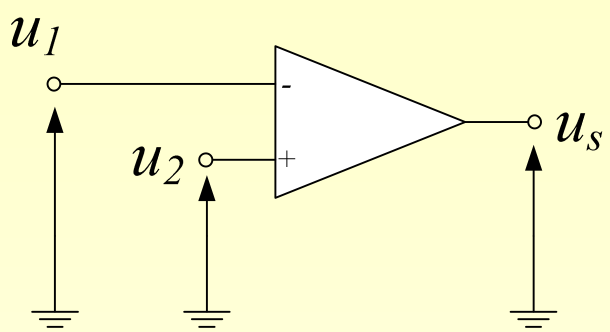
Valores característicos



Se consiguen en forma de circuitos integrados con una gran variedad de aplicaciones

$$U_d = U_2 - U_1$$

Tensión de modo diferencial



$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Tensión de modo común

Ganancia de modo

$$A_d = U_s / U_d$$ ← Diferencial

Común → $$A_c = U_s / U_c$$

Amplificador Ideal →

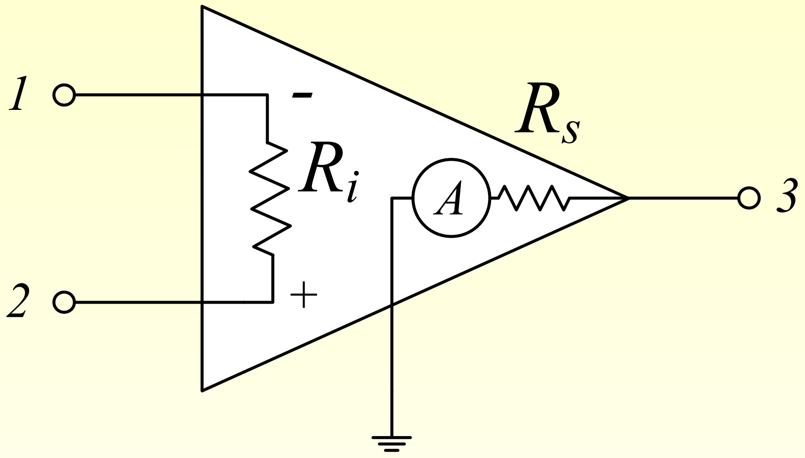
$$U_s = A_d \left(U_2 - U_1 \right)$$

Amplificador Real →

$$CMRR = A_d / A_c \approx \ldots 10^4 \ldots\ 10^6 \ldots$$

Relación de Rechazo de Modo Común

Amplificador Operacional Ideal



$$R_i \to \infty$$

$$R_s \to 0$$

$$A_d \to \infty$$

$$A_c \to 0$$

$$U_s = A_d\left(U_2 - U_1\right)$$

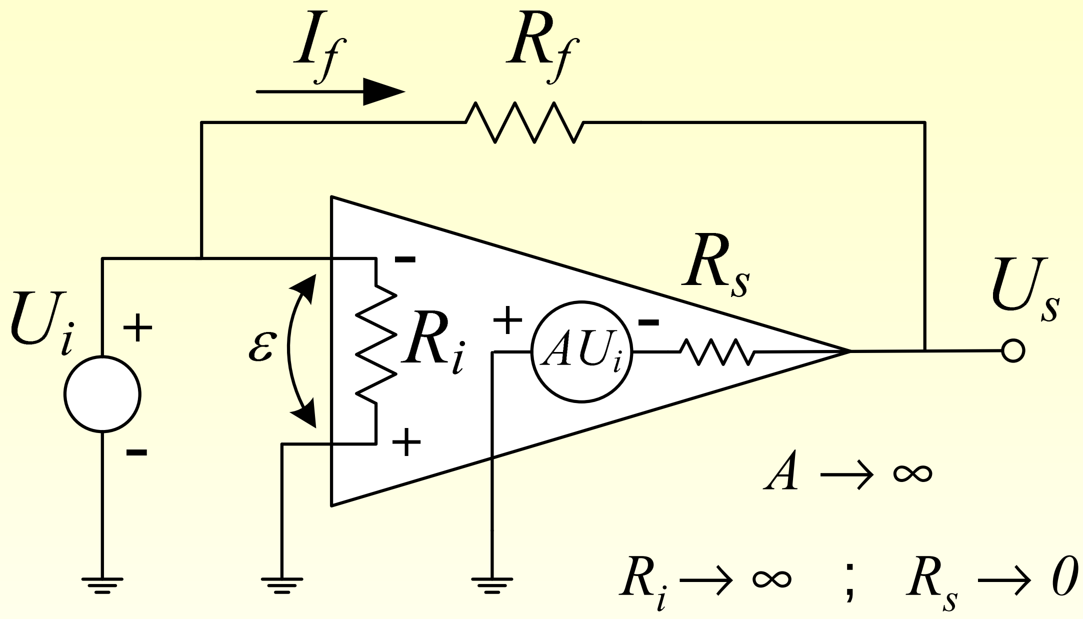
Amplifica ***la diferencia***

(En un amplificador real, existen apartamientos de lo anterior, aunque no suelen ser de gran importancia)

Es común denotar A_d *simplemente como* A

Amplificador Operacional Realimentado Negativamente

$$I_f = \frac{U_i + AU_i}{R_f + R_s}$$



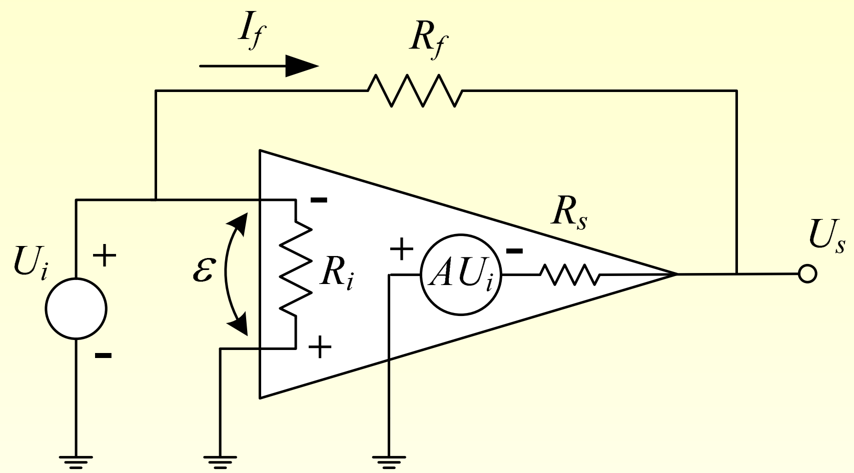
Si se desprecia el efecto de la corriente que se deriva por R_i ($\varepsilon \to 0$):

$$\Rightarrow \quad Z_i = \frac{U_i}{I_f} = \frac{R_f + R_s}{1 + A} \quad \therefore \quad A \to \infty \quad \Rightarrow \quad Z_i \to 0$$

La pata (-) del A.O. está al potencial de tierra sin estar vinculada galvánicamente a ella. Es una **"tierra virtual"**. Por ella no se deriva corriente a tierra.

Ejemplo: de la hoja de características

de un A.O. se obtienen



$$R_i > 1\ M\Omega \quad ; \quad R_s \approx 250\ \Omega$$

$$A > 10^5$$

Para $\quad R_f = 5\,k\Omega \quad$ se tiene:

$$Z_i = \frac{R_f + R_s}{1 + A} = \frac{(5 * 10^3 + 250)\,\Omega}{1 + 10^5} \approx 0{,}05\ \Omega$$

Ejemplo de aplicación de un Amplificador Operacional Realimentado Negativamente - Inversor

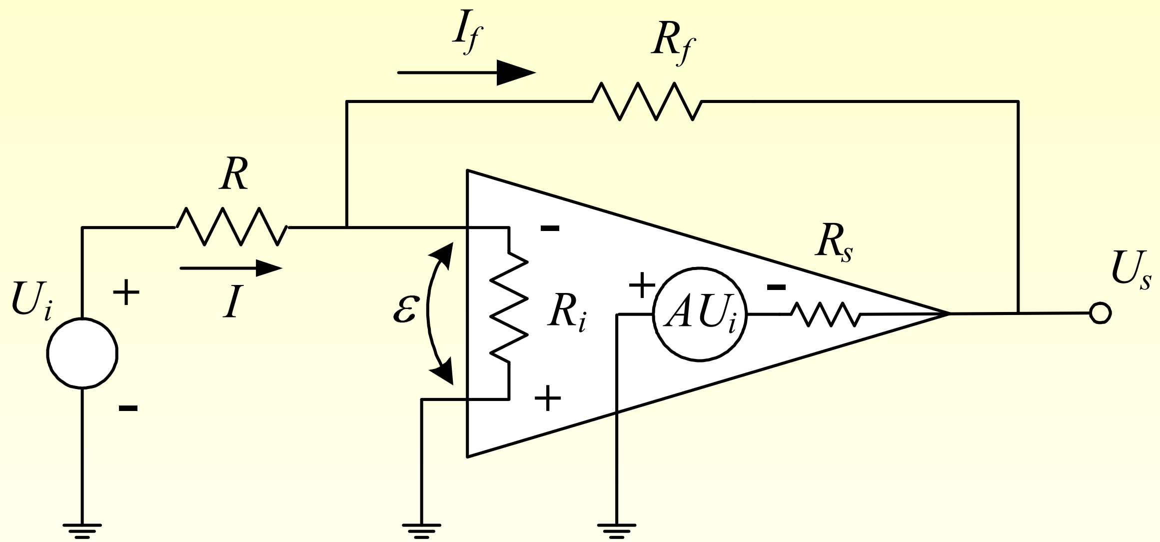
$$I = \frac{U_i}{R} = I_f$$

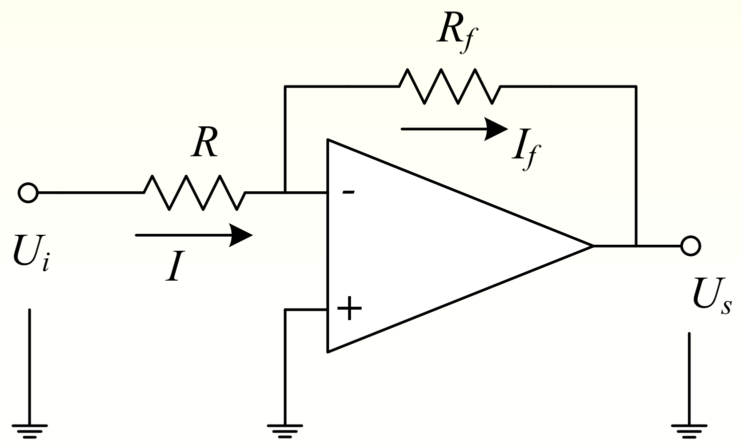
$$U_s = -I_f * R_f$$

$$= -\frac{U_i}{R} * R_f$$

$$\Rightarrow \frac{U_s}{U_i} = -\frac{R_f}{R} = A_f$$

Ganancia de lazo cerrado (Inversor)

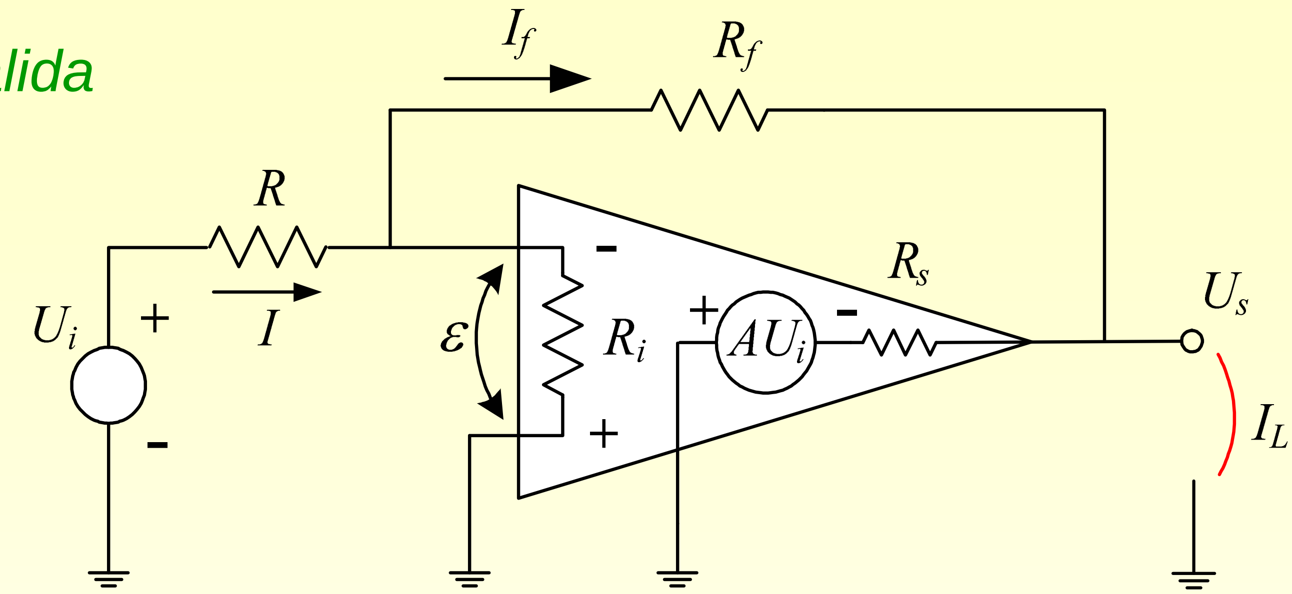




Impedancia de salida

$$Z_s = \frac{U_s}{I_L}$$

$$U_s = -\frac{R_f}{R} U_i$$

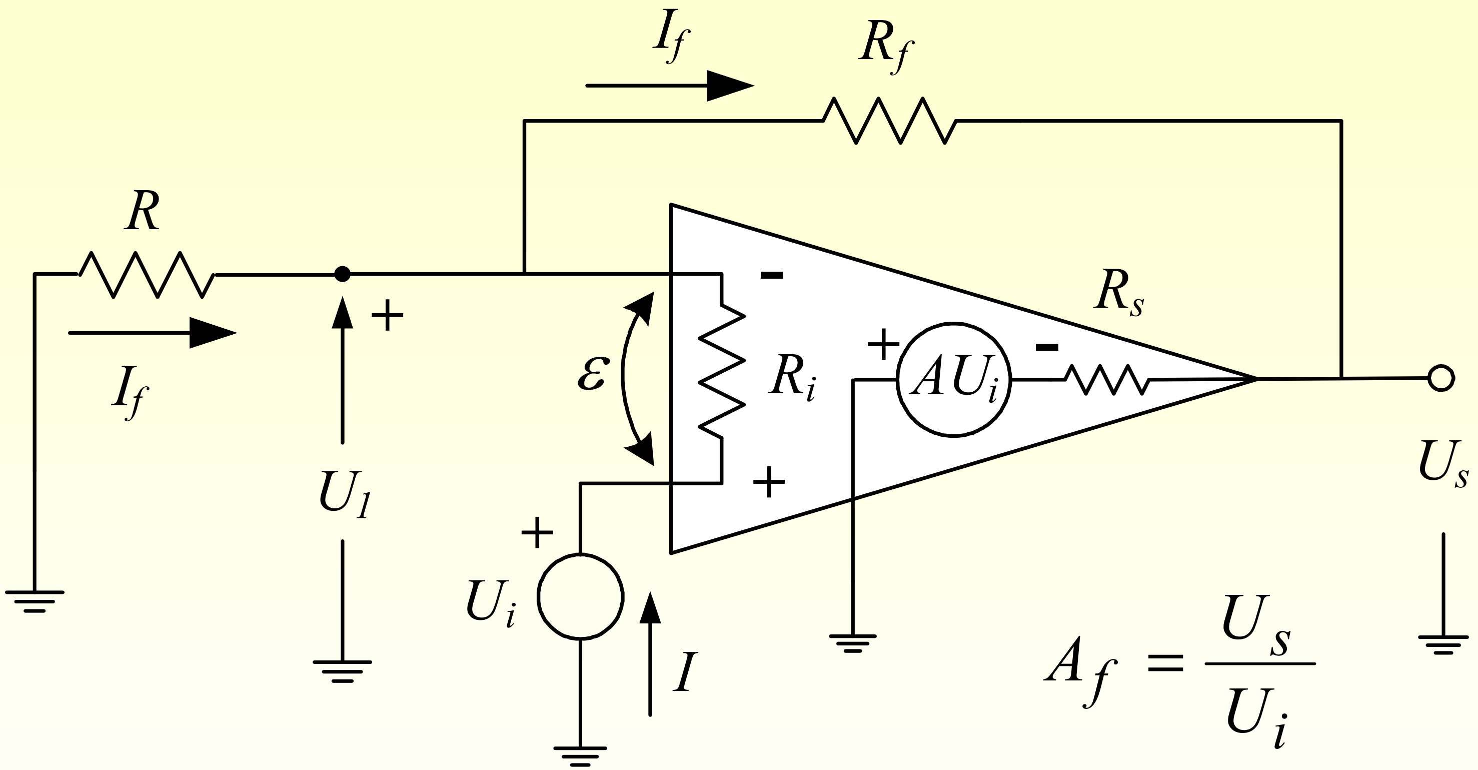


$$I_L = \frac{U_s}{R+R_f} - \frac{A * U_i}{R_s} \quad \Rightarrow \quad Z_s \approx \frac{R_s\left(R+R_f\right)}{A * R}$$

Para los datos del ejemplo anterior: $R_s \approx 250\ \Omega\ ;\ R_f = 5\ k\Omega\ ;\ A > 10^5$

Y con: $R = 5\ k\Omega$ Se tiene: $Z_s \approx 5\ m\Omega$

Ejemplo de aplicación de un Amplificador Operacional Realimentado Positivamente - No Inversor



$$A_f = \frac{U_s}{U_i}$$

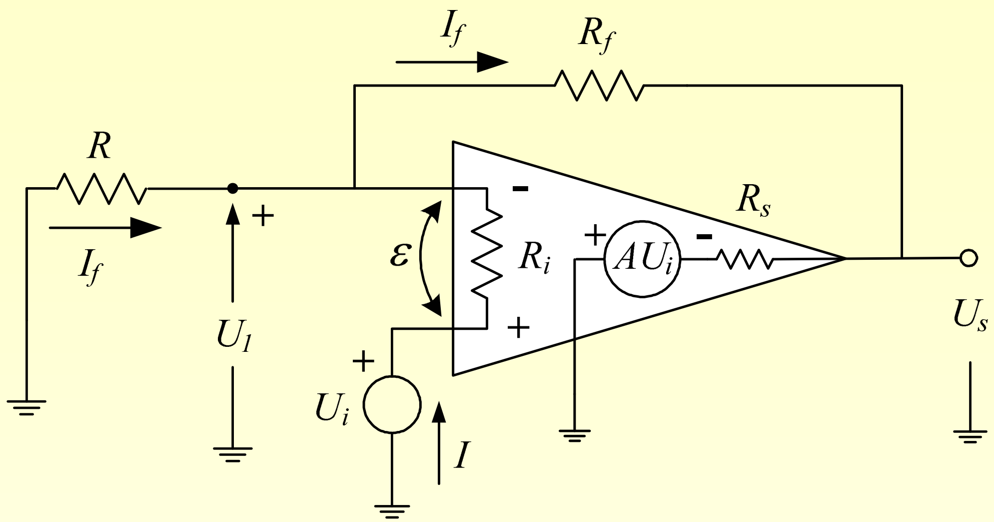
$$I = 0$$

$$U_1 = \frac{R}{R+R_f} * U_s = U_i$$

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R}$$

Ganancia de lazo cerrado (No Inversor)

Impedancia de entrada



$$I > 0$$

$$I = \frac{U_i - U_1}{R_i}$$

$$U_1 = \frac{R * A}{(1 + A) * R + R_f} U_i$$

$$Z_i = \frac{U_i}{I} = \frac{U_1}{I}$$

$$A >> 0 \qquad \Rightarrow \; Z_i \approx \frac{R_i * A}{1 + R_f / R}$$

Para los datos del
ejemplo anterior:

$$Z_i \approx \frac{10^6 * 10^5}{1 + 5 * 10^3 / 5 * 10^3} = 0{,}5 * 10^{11}\ \Omega$$

Ventajas de la configuración no inversora

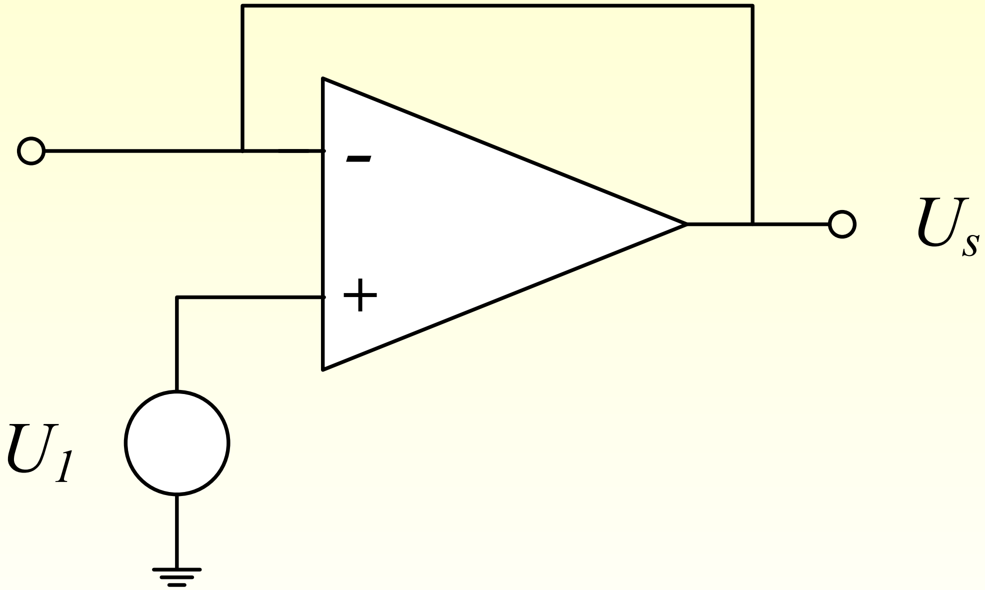
- ✓ Ganancia sin inversión.
- ✓ Impedancia de entrada muy grande.
- ✓ Impedancia de salida muy baja.
- ✓ Ganancia independiente del amplificador, siempre que ésta sea muy alta.
- ✓ Ideal como etapa amplificadora para fuentes con alta resistencia de salida.

Un caso particular de la configuración no inversora:

"Separador" o "Buffer"

Para la configuración no inversora vista antes:

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R}$$



Para este caso:

$$R_f = 0 \qquad \Rightarrow \quad A_f = 1$$

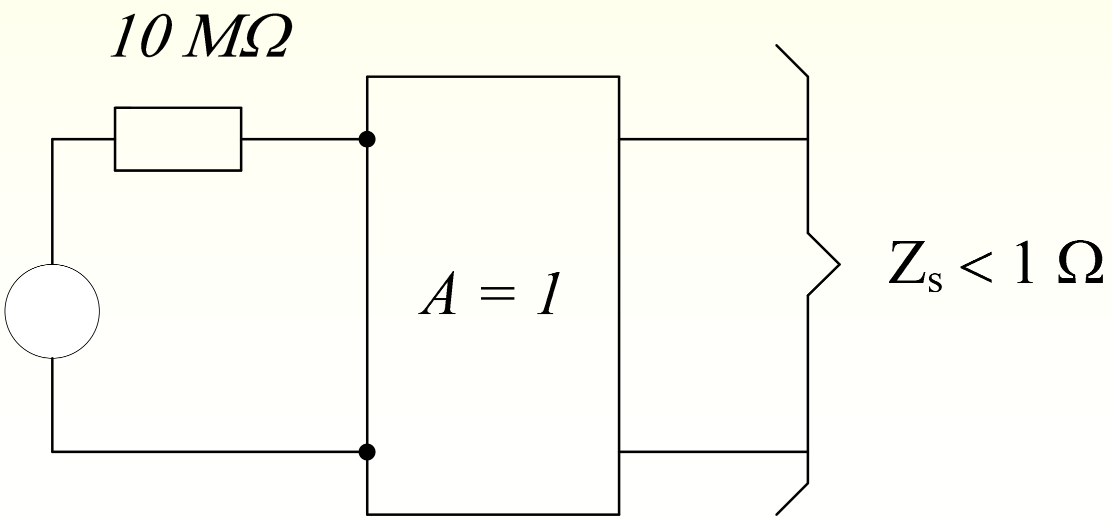
En resumen:

Se han analizado los A.O., que no son más que un tipo particular de amplificadores de alta ganancia.

Con una adecuada realimentación, se usan extensamente en circuitos de instrumentos digitales (y en muchos otros):

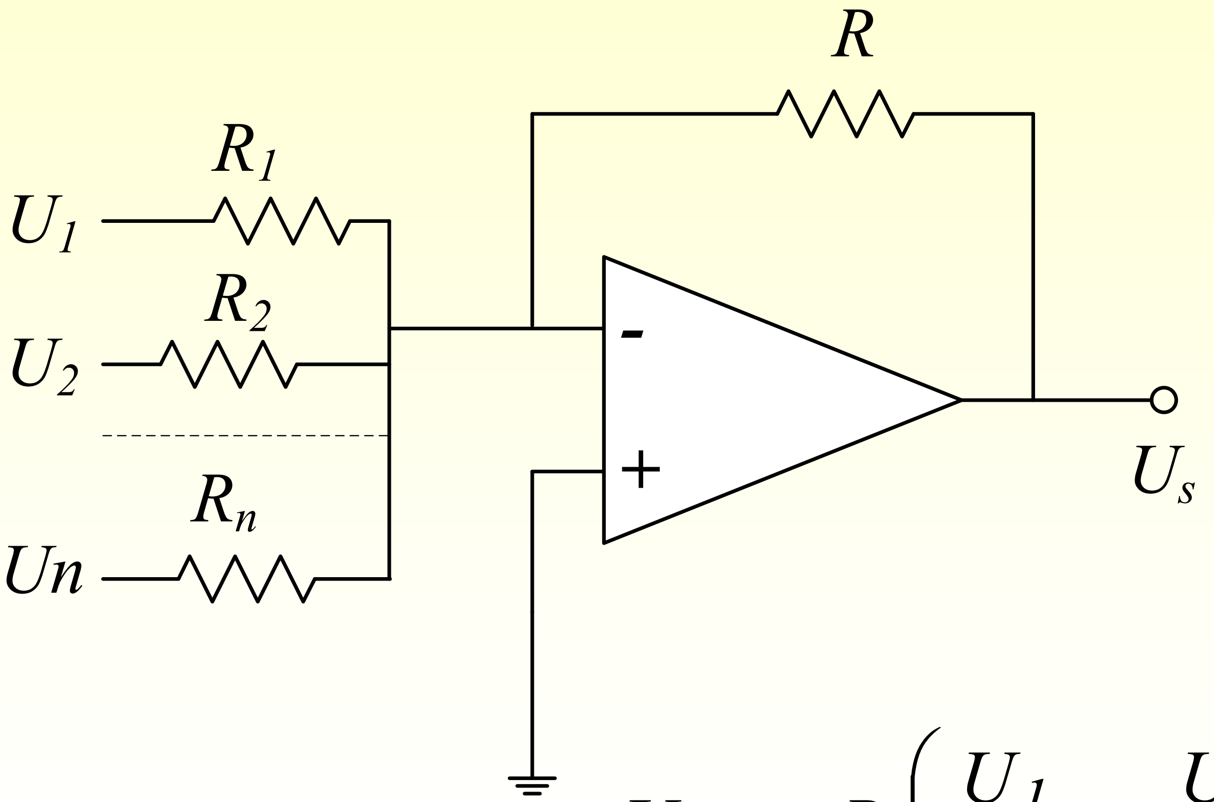
• con y sin inversión;

• son excelentes adaptadores de impedancia.



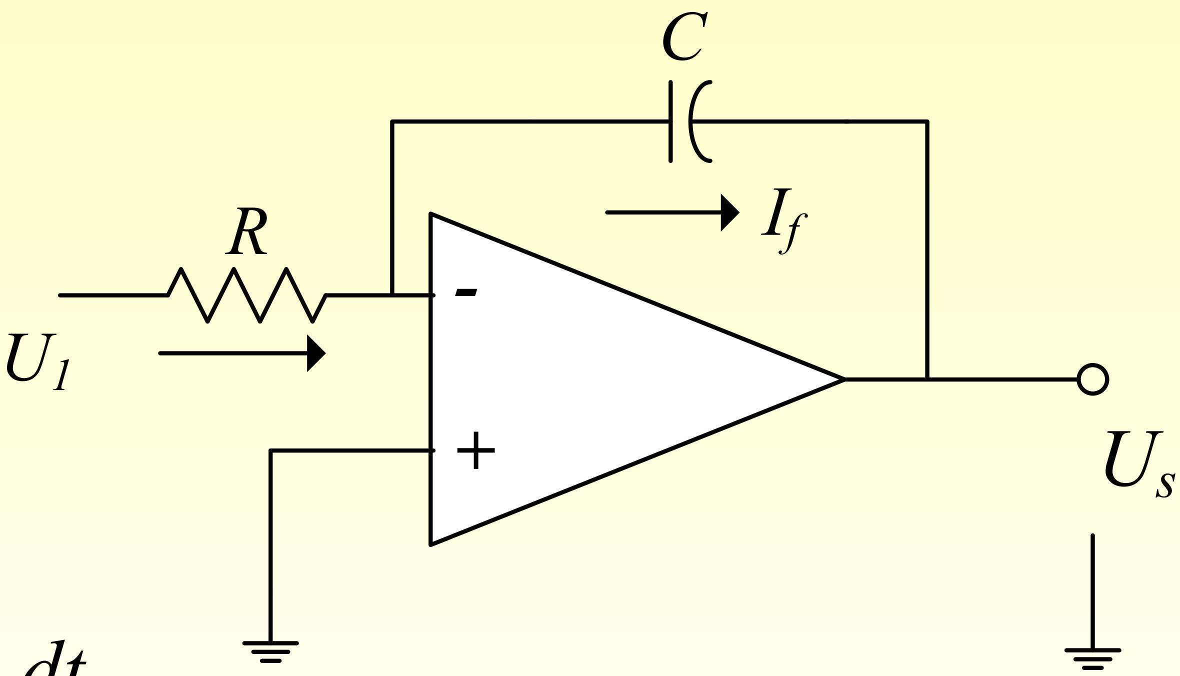
Algunas operaciones típicas con Amplificadores Operacionales

Sumador



$$U_s = -R\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \ldots + \frac{U_n}{R_n}\right)$$

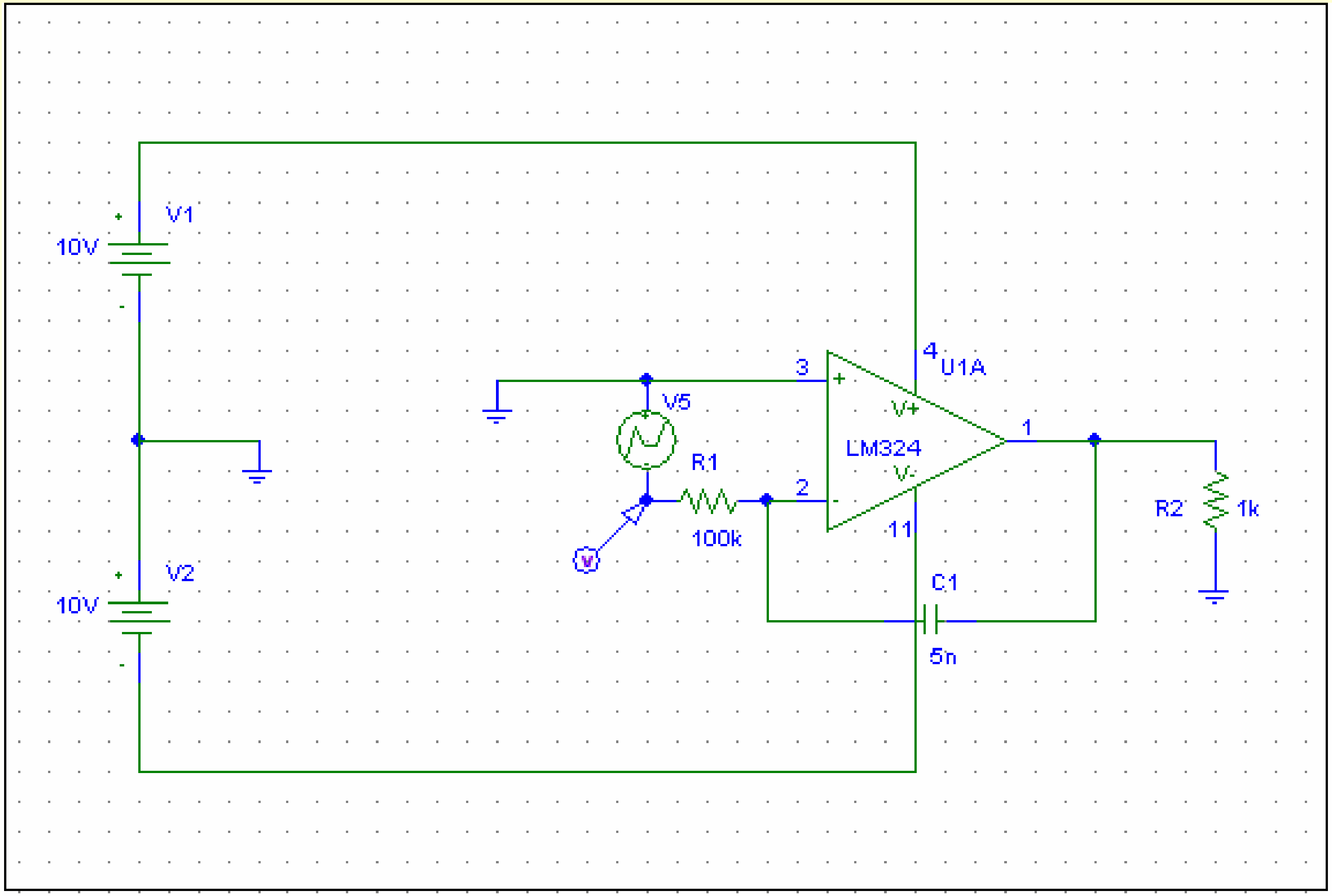
Integrador



$$U_s = -\frac{1}{C}\int I_f \, dt$$

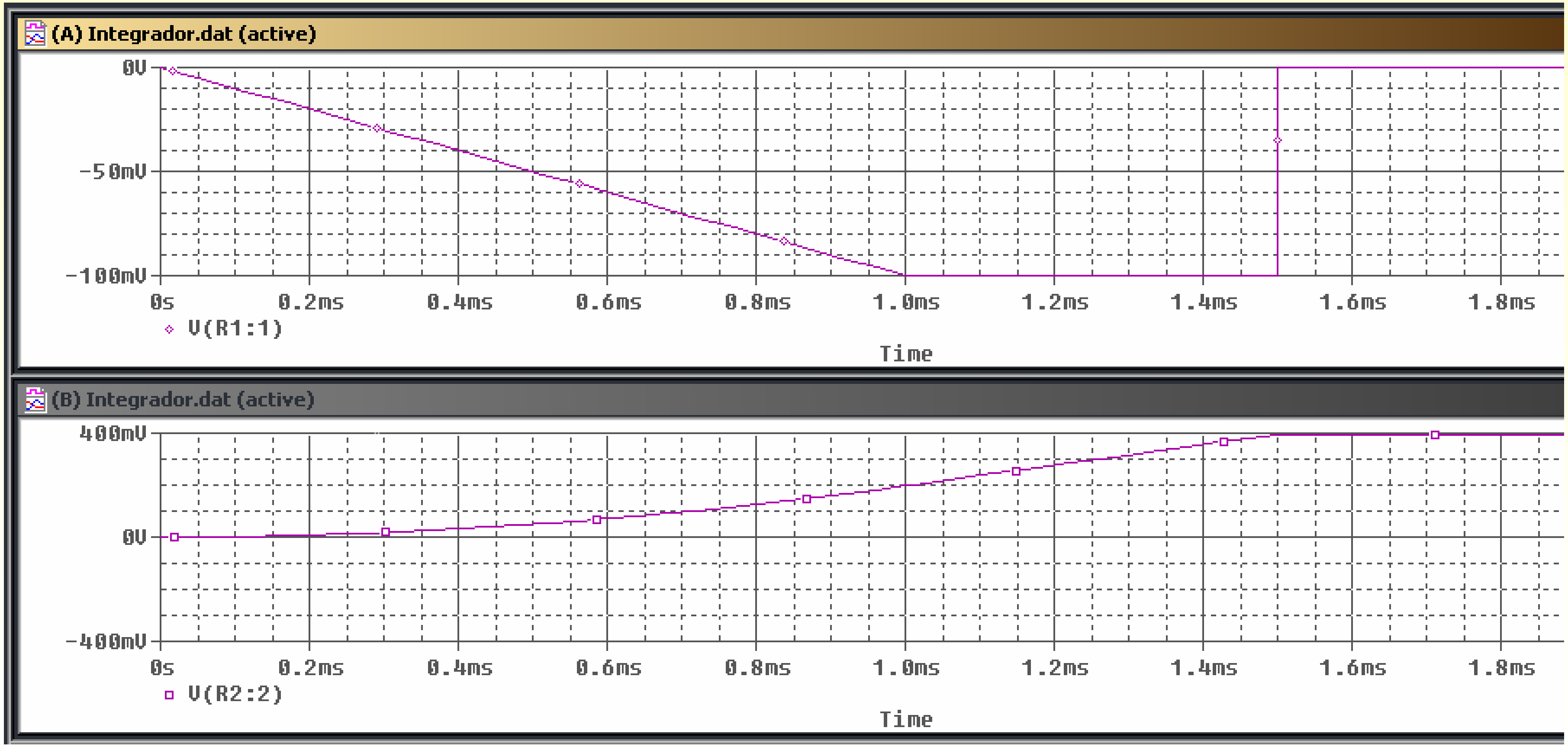
$$I_f = \frac{U_1}{R} \qquad \Rightarrow \qquad U_s = -\frac{1}{RC}\int U_1 \, dt$$

Funcionamiento de un integrador



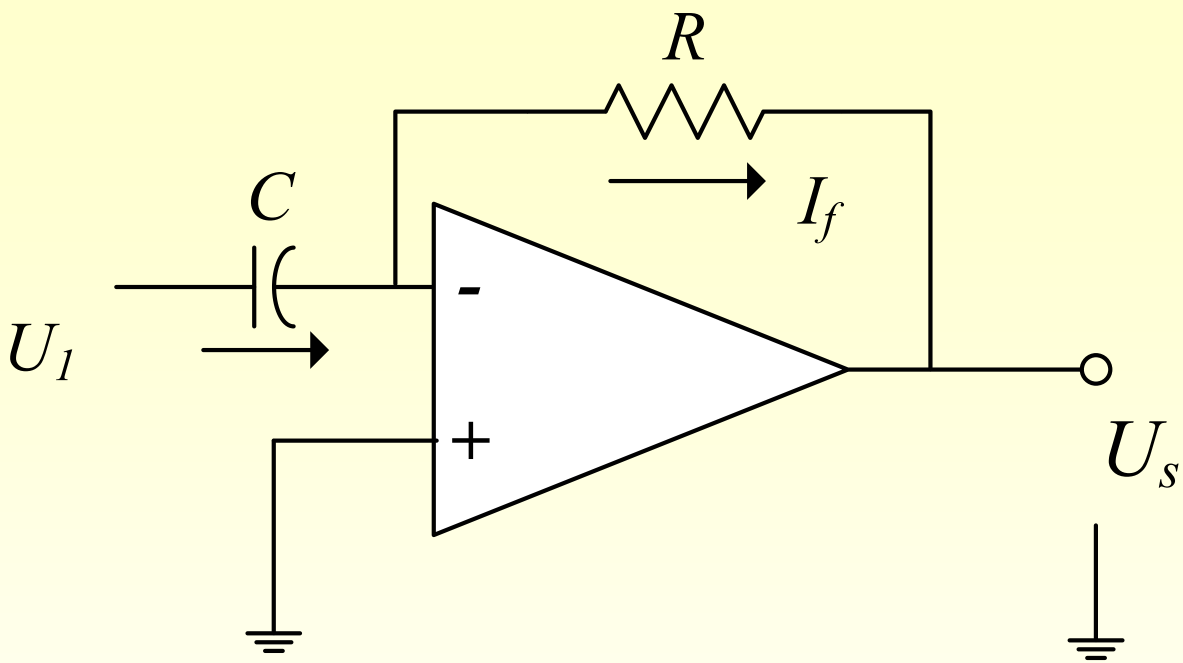
Salidas del simulador

Fuente



Salida

Diferenciador

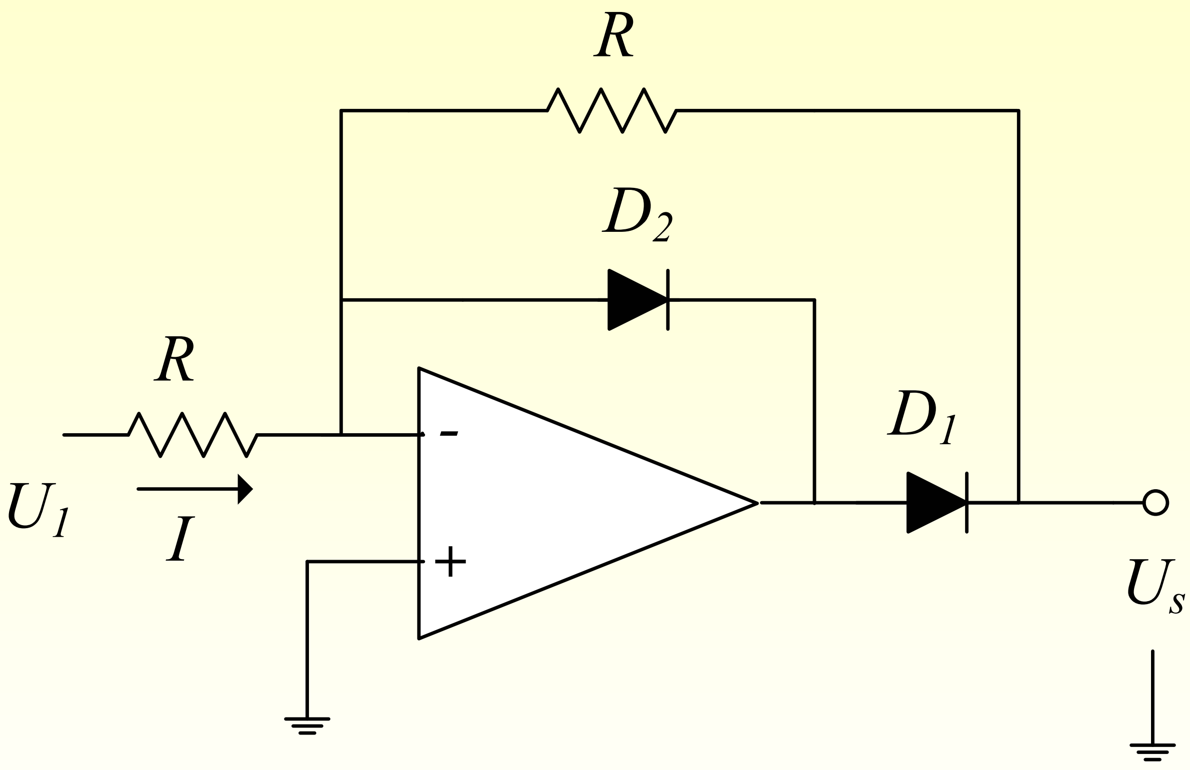


$$U_1 = -\frac{1}{C}\int I_f \, dt$$

$$\Rightarrow \; I_f = C\,\frac{dU_1}{dt}$$

$$U_s = -\,I_f\,R \qquad \Rightarrow \quad U_s = -RC\,\frac{dU_1}{dt}$$

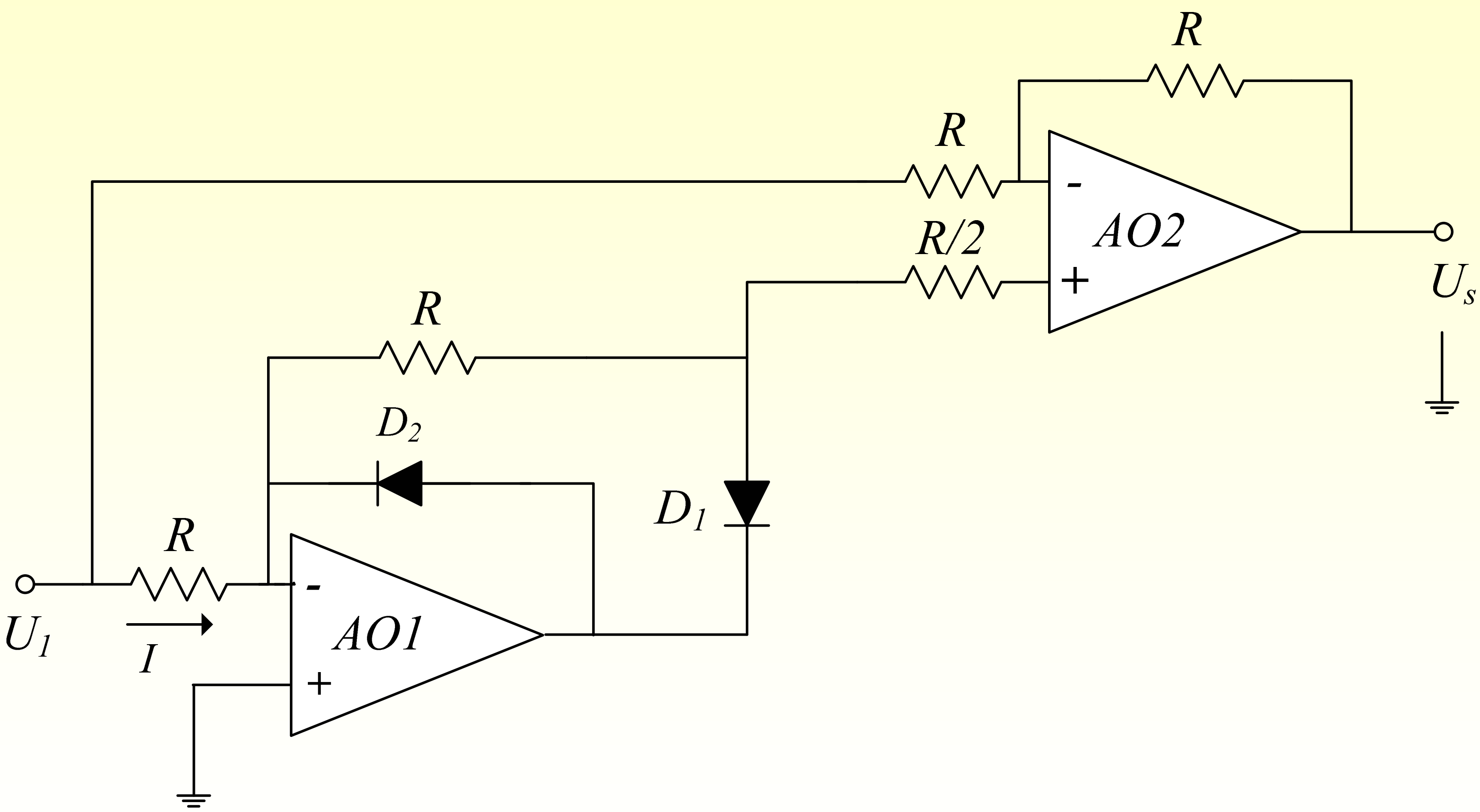
Rectificador de precisión de media onda



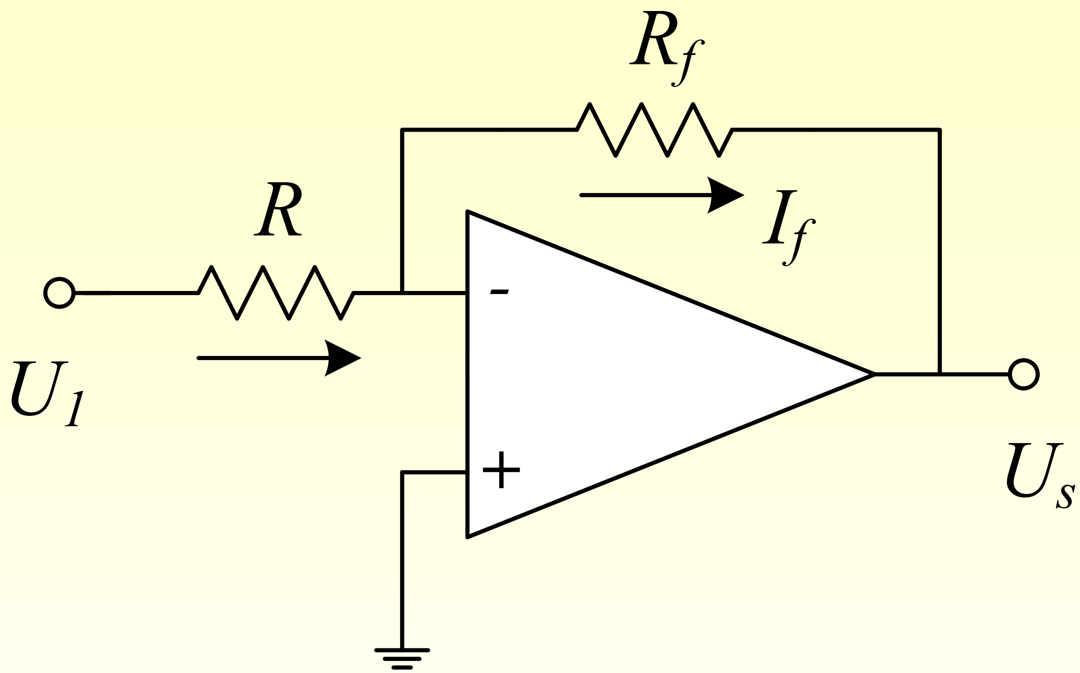
$$U_1 < 0 \quad \Rightarrow \quad U_s = -U_1$$

$$U_1 > 0 \quad \Rightarrow \quad U_s = 0$$

Rectificador de precisión de onda completa



Fuente de corriente

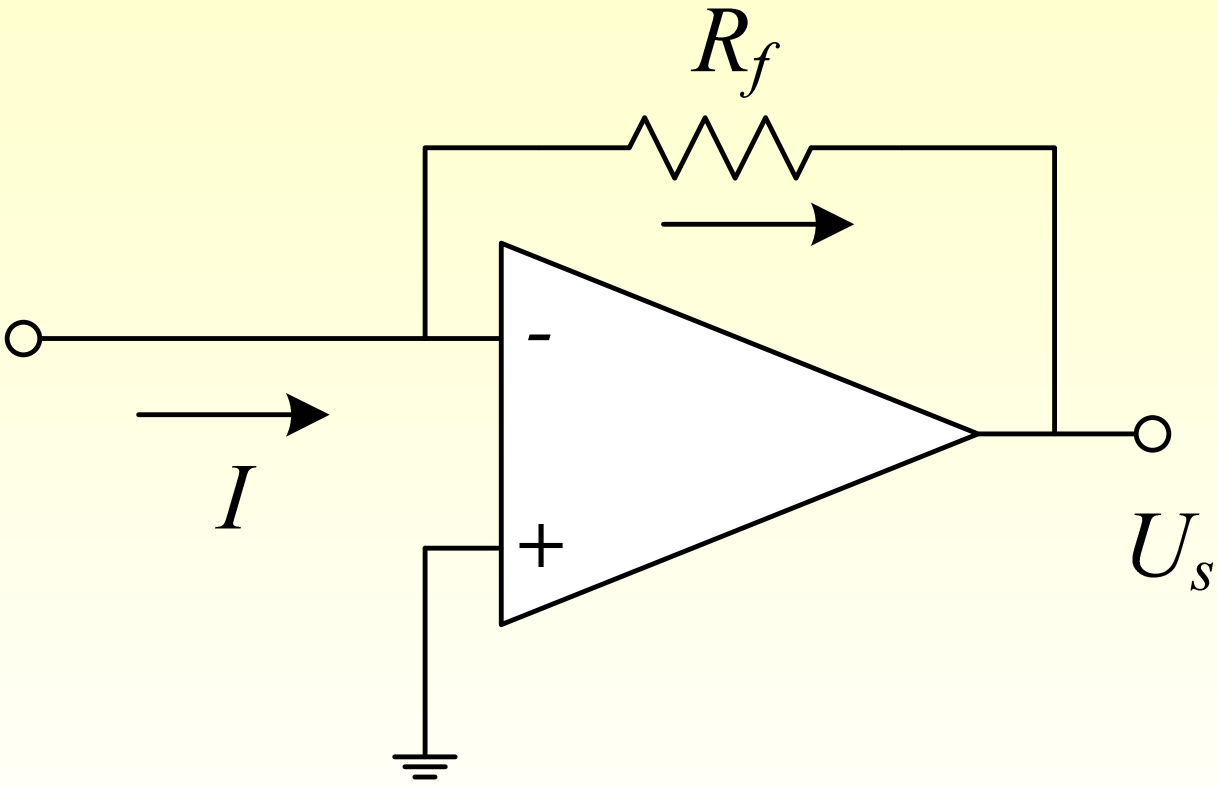


$$\frac{U_s}{R_f} = -I_f$$

$$\frac{U_1}{R} = I_f$$

$$U_1 = cte. \quad \Rightarrow \; I_f = cte.$$

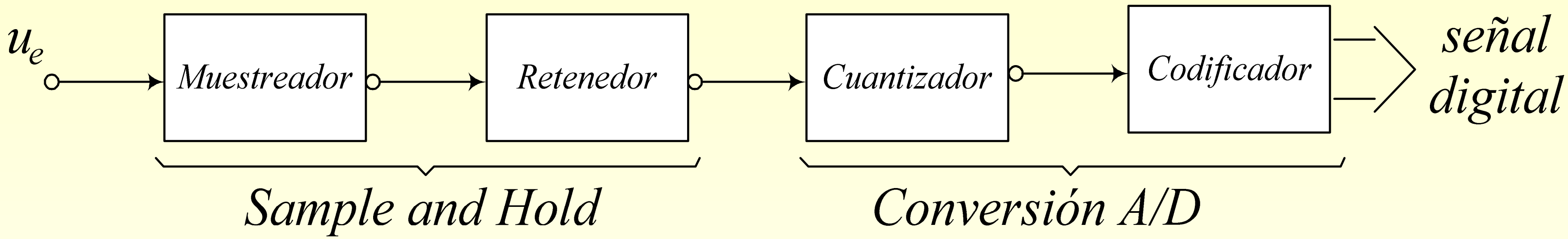
Convertidor corriente - tensión



I **:** generador de corriente

$$U_s = -I\ R_f$$

Esquema en bloques del proceso de Conversión Analógico – Digital (CAD)

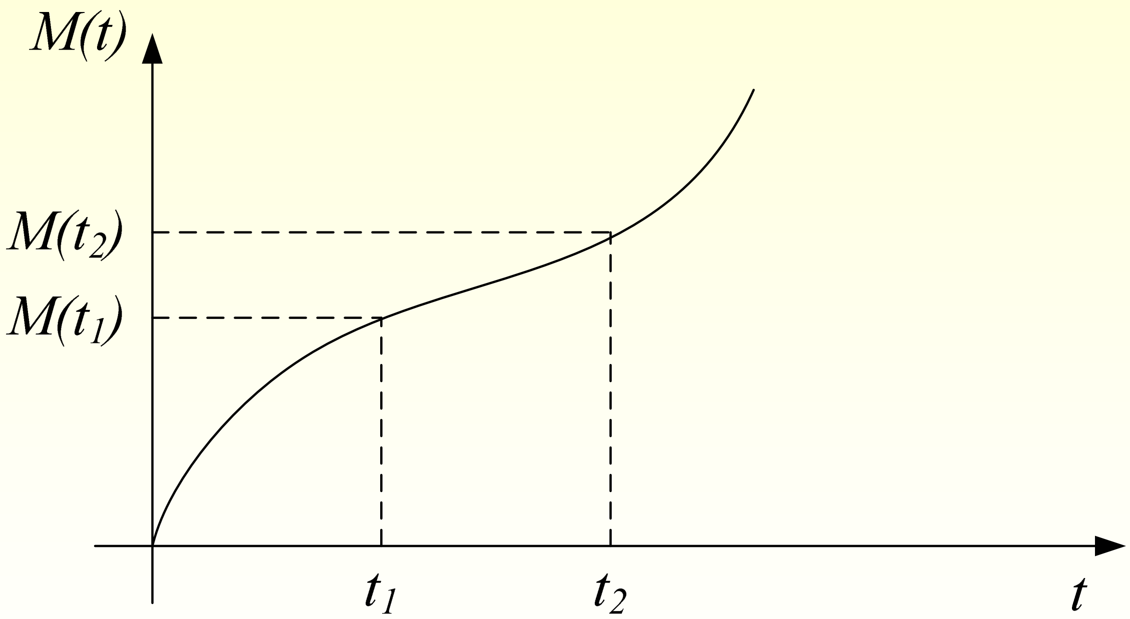


Los dos primeros bloques generalmente se encuentran en un único circuito conocido como circuito ***"sample and hold"*** (**S/H**). Son necesarios cuando se deben digitalizar señales que varían con el tiempo.

El cuantizador y el codificador generalmente están incluídos en un solo circuito denominado **Conversor Analógico - Digital**.

Muestreo

Señales analógicas: en general tienen variaciones continuas. No existen valores “prohibidos”. Entre un valor y otro, existe una cantidad infinita de valores posibles.

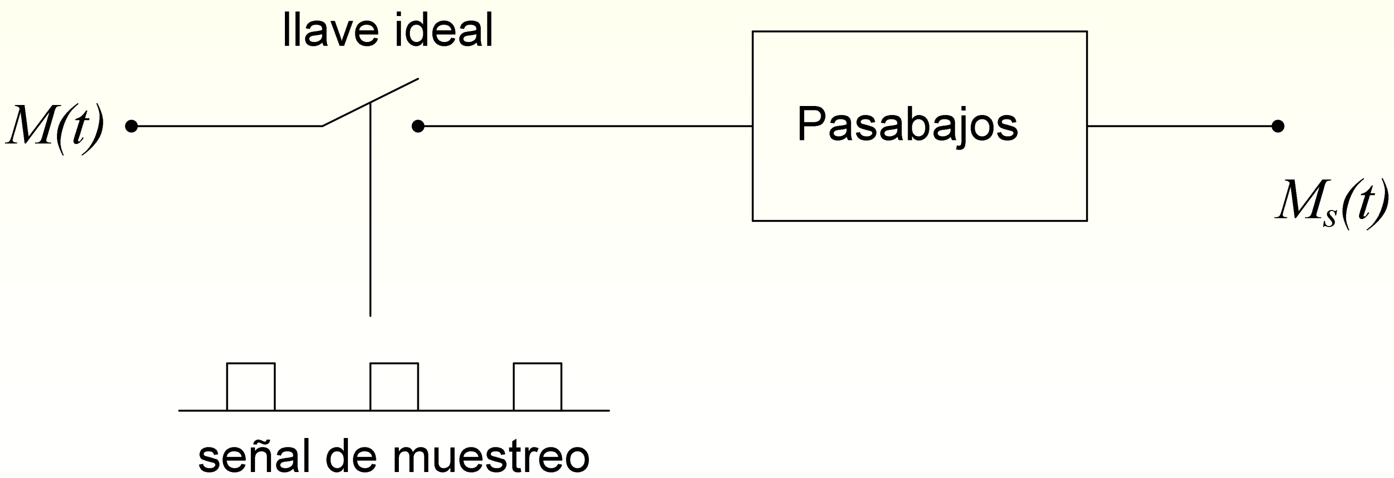


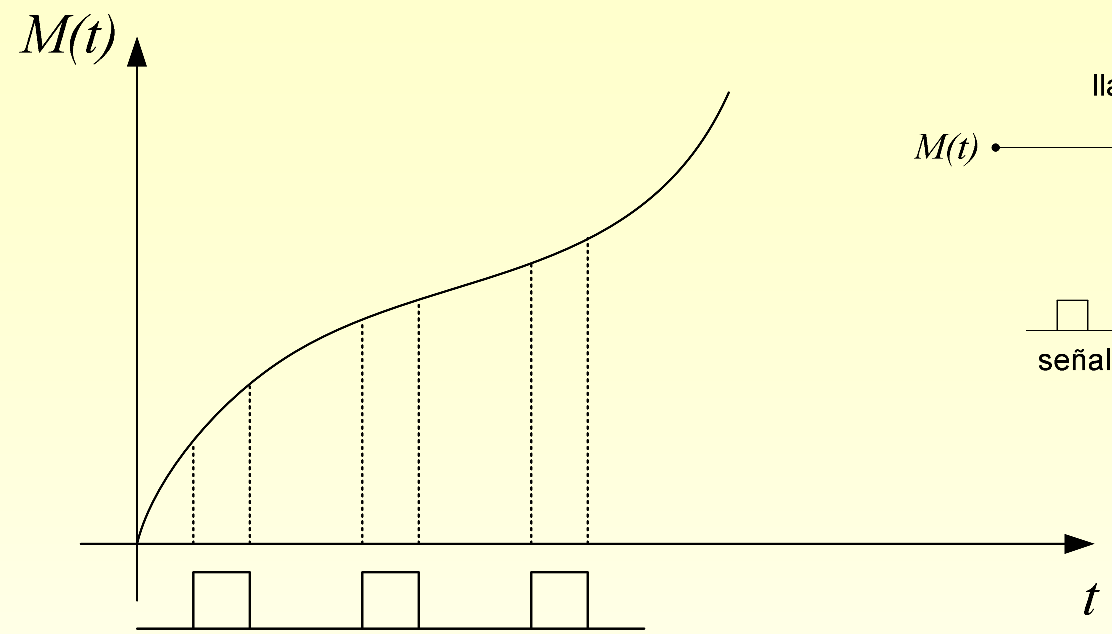
En el caso muy general dibujado, la señal puede tomar cualquiera de los valores comprendidos entre $M(t_1)$ y $M(t_2)$

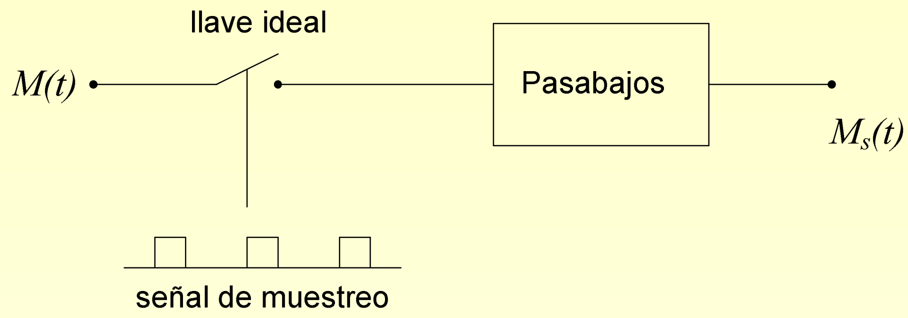
La mayoría de las señales que aparecen en los circuitos comunes de medición son de naturaleza analógica (como así también son las que interpretan nuestros sentidos, como el oído por ejemplo).

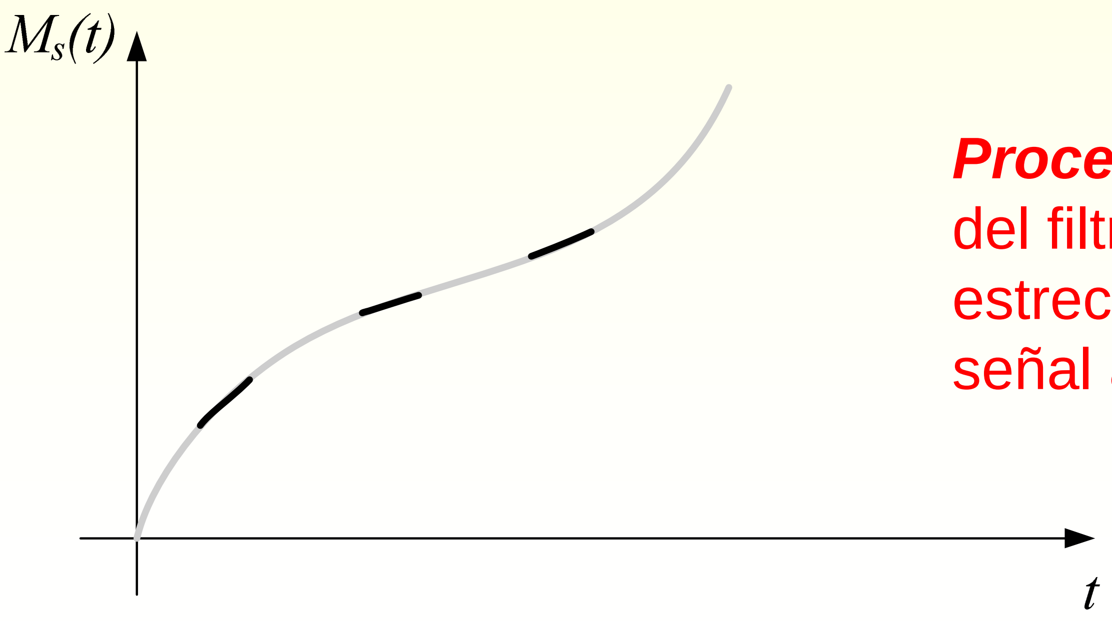
Transformarlas en digitales, ***facilita su manejo*** (procesamiento mucho más sencillo), ***su almacenamiento*** y ***reduce***, entre otras cosas, ***su sensibilidad a los ruidos***.

La base de la digitalización de señales radica en el teorema del muestreo:







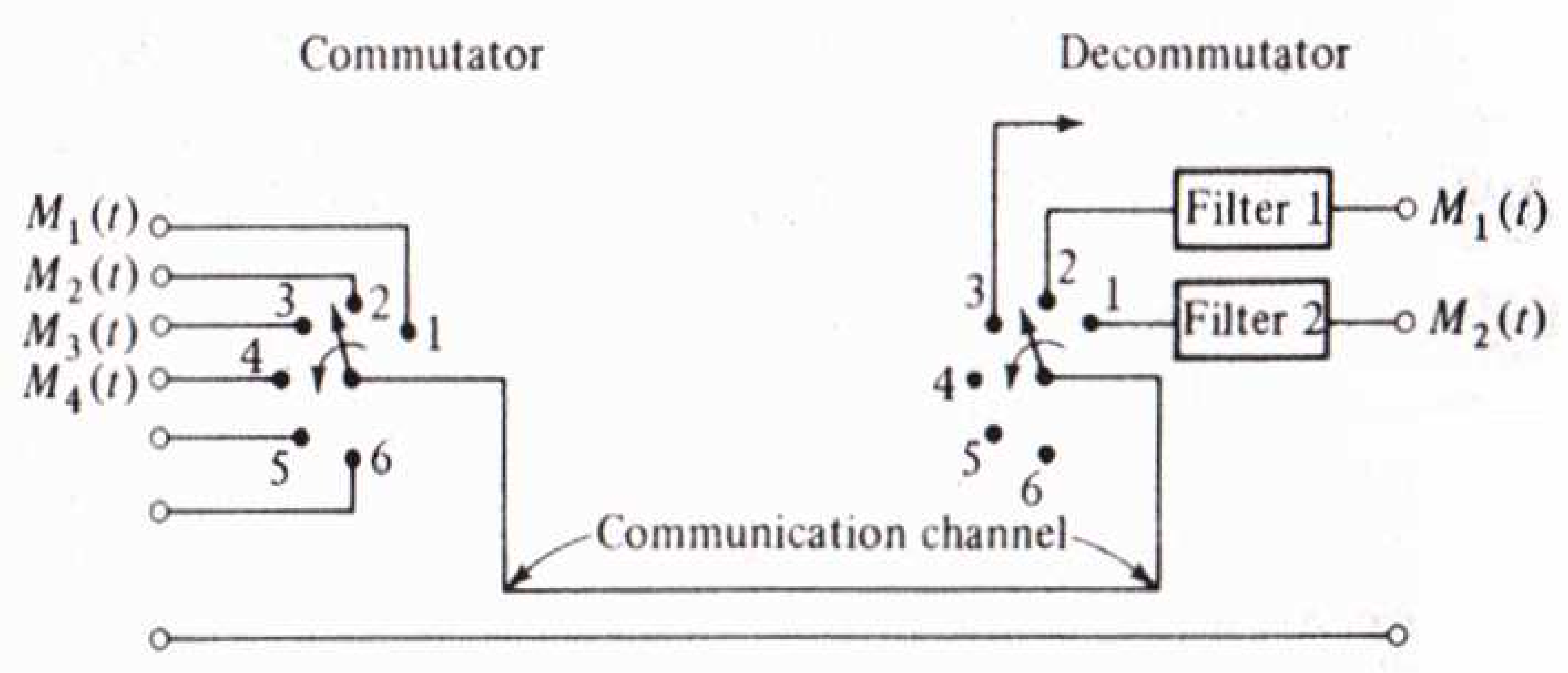


Proceso idealizado: luego del filtro pasabajos de banda estrecha, se vuelve a tener la señal analógica original.

Observaciones:

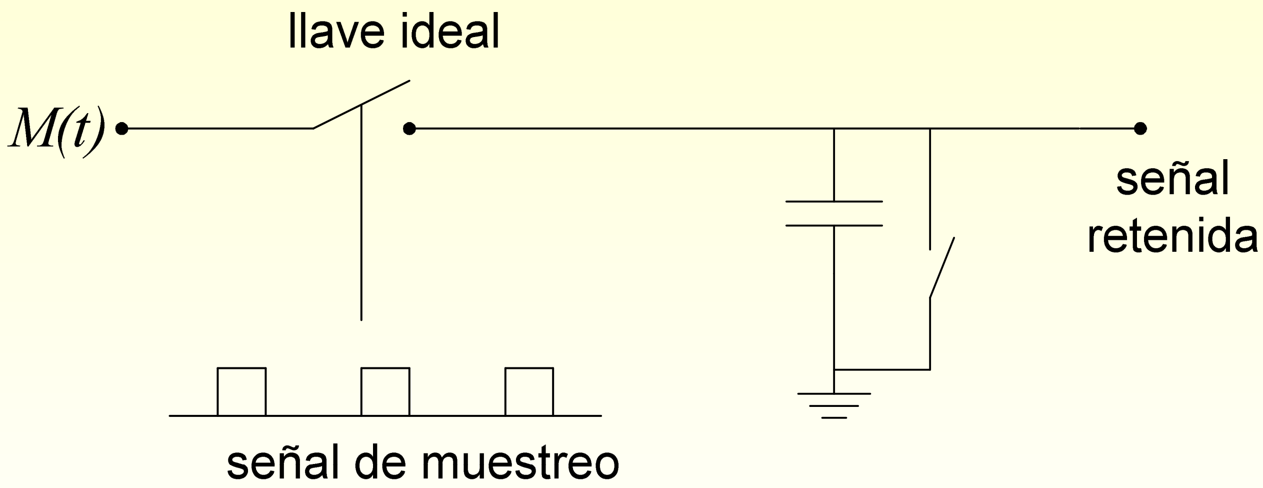
- La señal muestreada, si bien es discontinua, es todavía ***analógica*** pues no existen restricciones a los valores que puede tomar.

- Mientras la llave está abierta, no hay señal transmitida en el canal de comunicación $\Rightarrow$ pueden usarse esos lapsos para transmitir ***otra u otras señales muestreadas.***



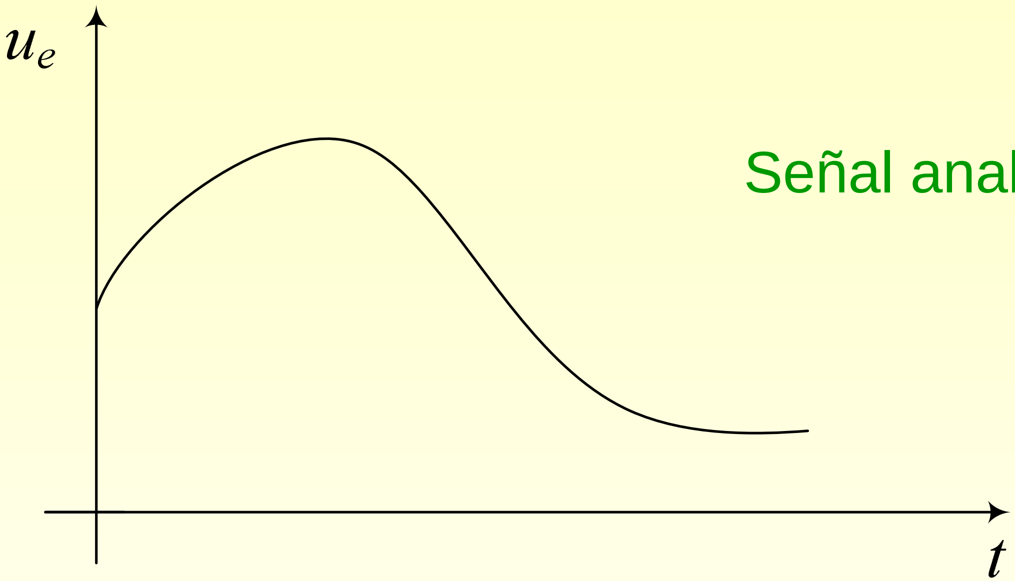
Muestreo y Retención

“Sample and Hold” (S/H)

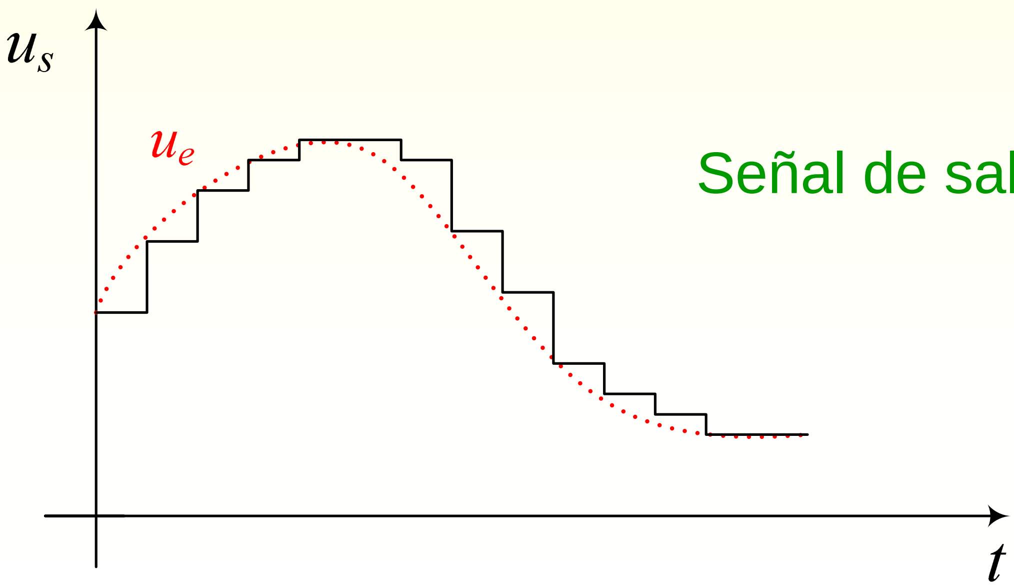


Esquema elemental de un circuito de muestreo y retención

Proceso básico de muestreo y retención



Señal analógica a muestrear

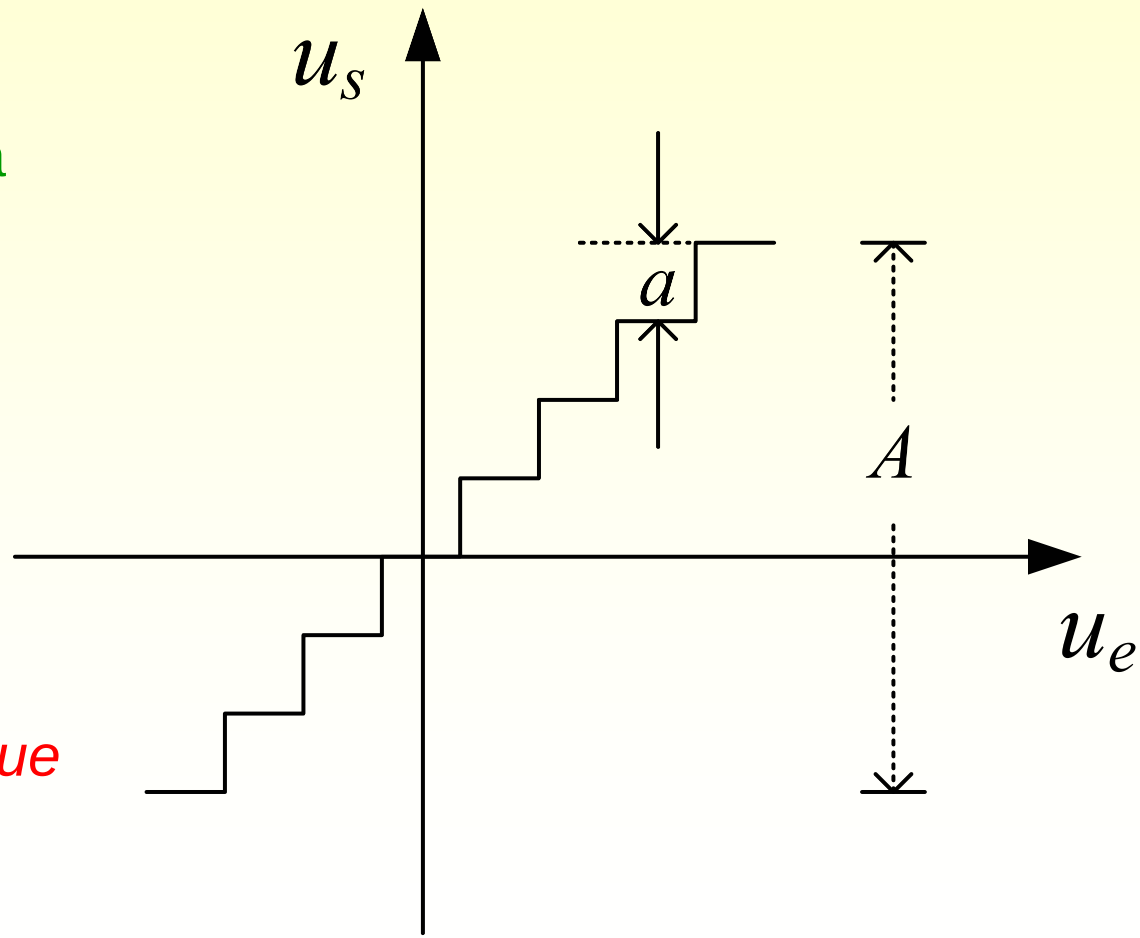


Señal de salida de un circuito S/H

(también analógica)

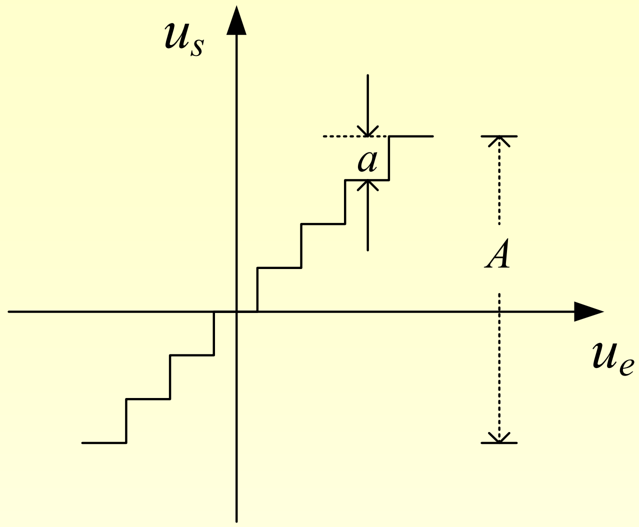
Cuantización: Proceso por el cual las infinitas amplitudes posibles de la señal analógica de entrada se subdividen en un número predeterminado de valores. Se realiza en un bloque cuya transferencia es la siguiente:

A la entrada continua u_e, le corresponde la salida discontinua u_s



Curva característica de transferencia de un bloque cuantizador de 8 niveles igualmente espaciados

Cuantización

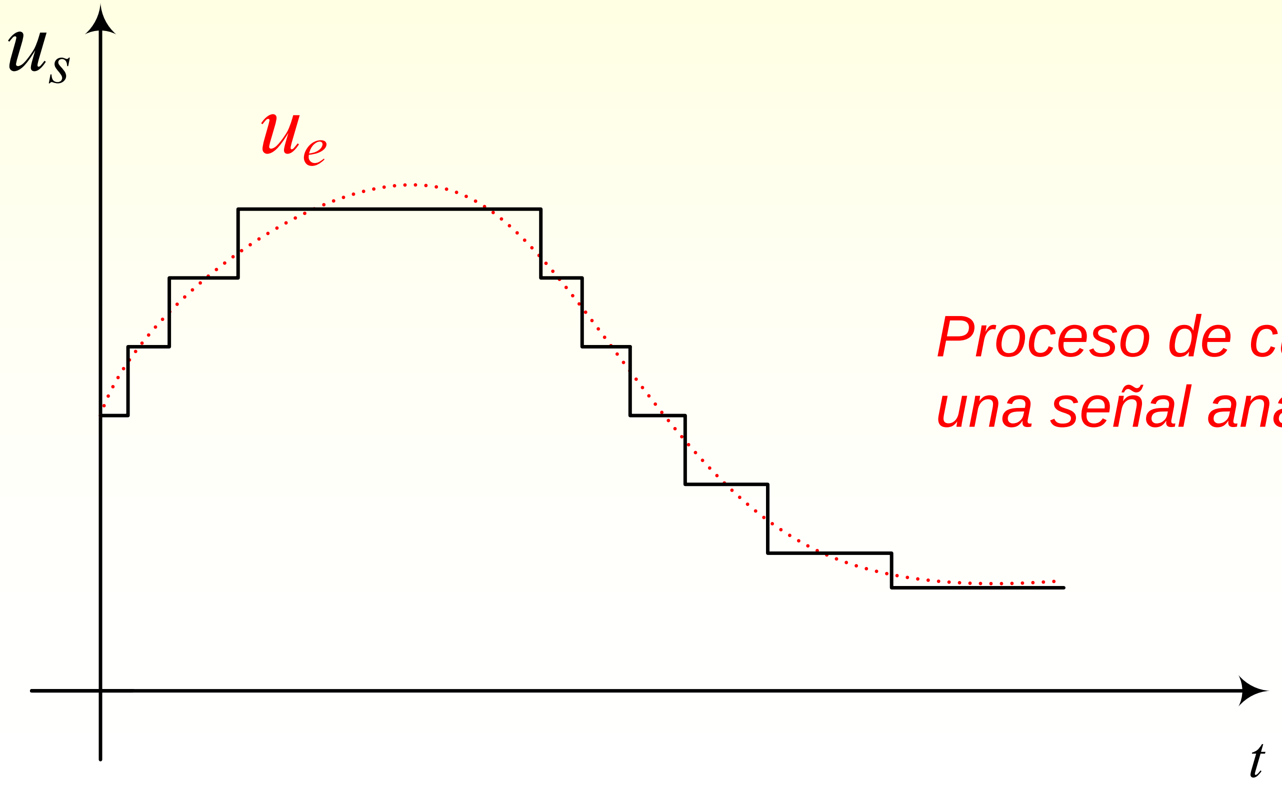


A: Rango dinámico

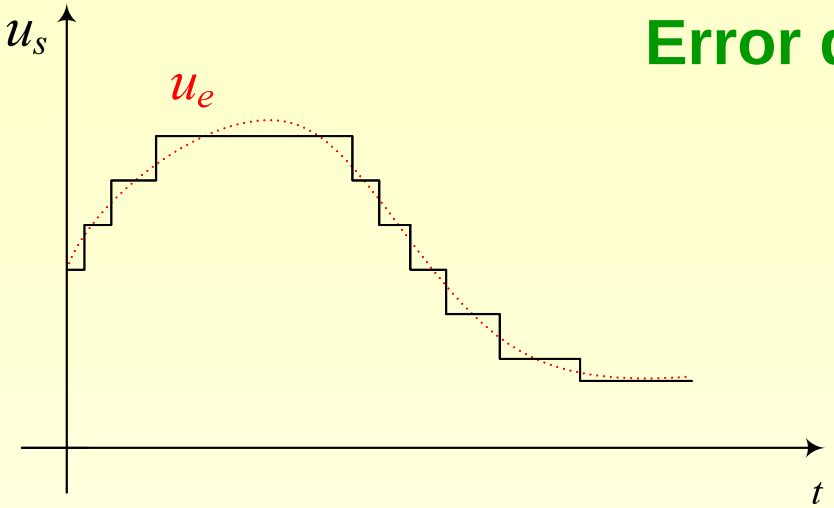
a: Paso de cuantización

M: Nº total de niveles de cuantización

$$a = \frac{A}{M-1}$$



Proceso de cuantización de una señal analógica



Error de Cuantización

Aparece como consecuencia de que la señal de salida, cuantizada (discontinua), es una aproximación de la entrada, continua.

La señal cuantizada en el nivel U_i podría deberse a cualquier valor de amplitud comprendido entre U_i-$a/2$ y $U_i+a/2$.

El error de cuantización será entonces sistemático e indeterminado, con valor límite:

$$E_c = \pm \, {}^{a}\!/_{2}$$

- El error de cuantización será tanto menor cuanto mayor sea el número de niveles posibles (para un mismo rango dinámico).
- Conviene utilizar el conversor a fondo de escala, a fin de minimizar el error relativo.

Codificación

Codificar la señal cuantizada significa darle una representación que sea de fácil manejo e interpretación, desde el punto de vista de los circuitos empleados.

Codificación Decimal

$$N_{10} = d_n * 10^n + d_{n-1} * 10^{n-1} + \ldots + d_0 * 10^0$$

$$\Rightarrow \quad N_{10} = d_n \; d_{n-1} \; \ldots \; d_0$$

Es la codificación más empleada en la vida cotidiana, pero cada uno de los los n coeficientes debe poder tomar 10 valores diferentes para lograr la representación.

Muchas veces es necesario operar con códigos más convenientes y hacer luego una conversión a decimal, más fácilmente comprensible para el usuario final (p.e. Multímetros digitales).

Codificación Binaria

$$N_2 = b_n * 2^n + b_{n-1} * 2^{n-1} + \ldots + b_0 * 2^0$$

$$\Rightarrow \quad N_2 = b_n \; b_{n-1} \; \ldots \; b_0$$

Es un sistema de codificación ideal: cada coeficiente sólo puede valer 0 o 1.

A cada uno de los dígitos binarios b_i se le da el nombre de ***bit** (**b**inary dig**it**)*

Ejemplo:

Decimal: 14

Binario: 1110

$$(1 * 2^3 + 1 * 2^2 + 1 * 2^1 + 0 * 2^0)$$

La Codificación Binaria puede caracterizarse fácilmente: presencia o ausencia de tensión, nivel alto o bajo, señal positiva o negativa, etc. (dos estados netamente distinguibles)

bit más significativo
MSB → 1110 ← bit menos significativo ***LSB***

binary digi**t**

Notar que la cantidad de niveles de discretización dependen del número de bits:

$$M = 2^n$$

(lo mismo pasa, pero en otra escala, en el sistema decimal)

Ejemplos:

- ❖ 3 cifras decimales ➔ $10^3=1000$ valores posibles (niveles)

  ➔ Resolución = $1/1000$ $(0{,}1\ \%)$

- ❖ 3 bits ➔ $2^3 = 8$ valores posibles (niveles)

  ➔ Resolución = $1/8$ $(12{,}5\ \%)$

Así, para tener una resolución adecuada en aparatos de medida, aún no demasiado exactos, se necesitan 8 bits o más.

Nº de Bits	Cantidad de niveles	Resolución [%]
8	256	0,39
9	512	0,20
10	1024	0,10
12	4096	0,02
16	65536	0,002

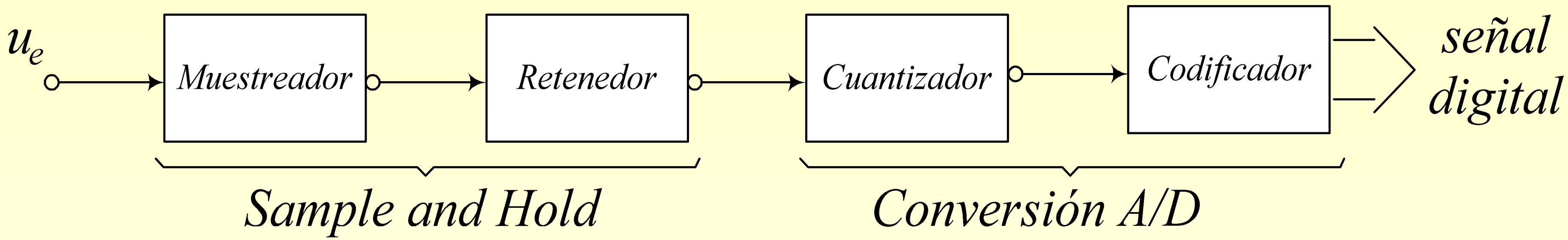
Conversión rápida de binario a decimal:

Nº a convertir: **17**

Cociente al dividir por 2 (de derecha a izquierda)	0	1	2	4	8
Resto (Nº en Binario Natural)	1	0	0	0	1

Atención: el código que hemos mostrado en estos ejemplos es el denominado Código Binario Natural (respeta las potencias crecientes de 2, de derecha a izquierda), pero no es el único.

Resumiendo: **Conversión Analógico – Digital (CAD)**



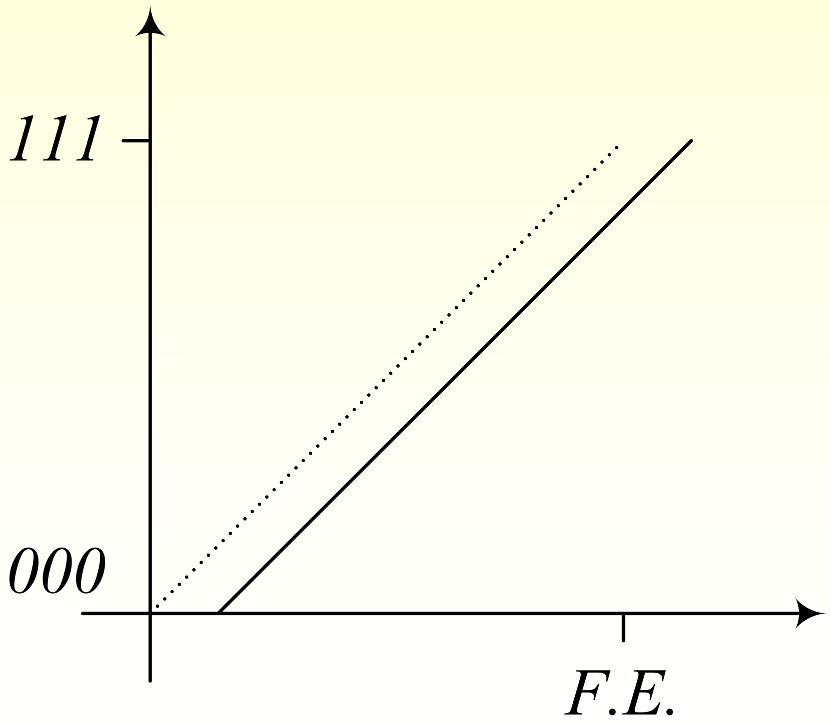
Los dos primeros bloques generalmente se encuentran en un único circuito conocido como circuito ***"sample and hold"*** (**S/H**). Son necesarios cuando se deben digitalizar señales que varían con el tiempo.

El cuantizador y el codificador generalmente están incluídos en un solo circuito denominado **Conversor Analógico - Digital**.

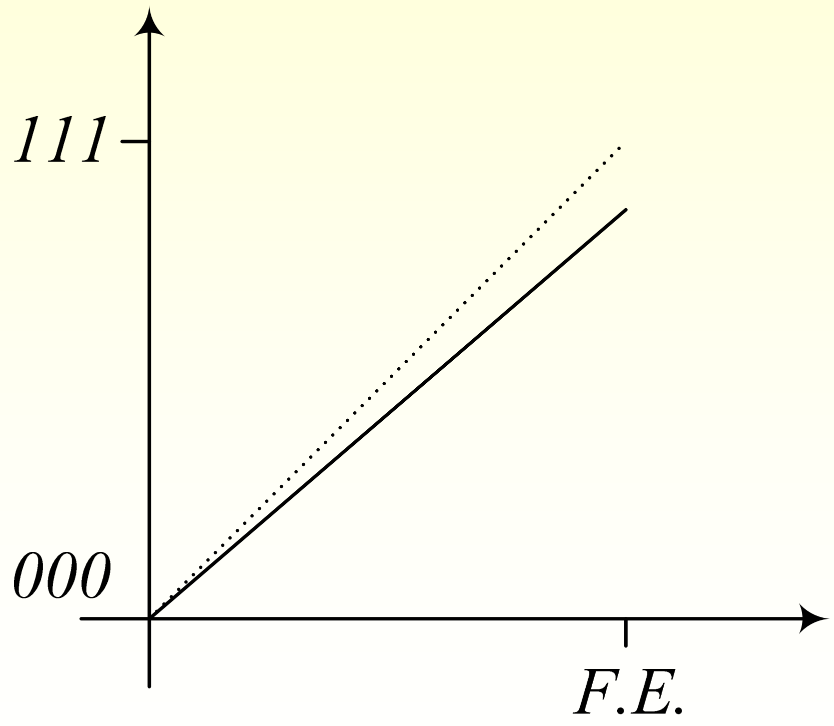
Finalmente, la señal es transcodificada a una forma más simple de entender por un operador humano, como por ejemplo un formato numérico decimal (**3½**, **4½ dígitos**) o un formato de **"barras"**.

Errores de Digitalización

Además del error de cuantización ya mencionado, los sistemas de digitalización reales exhiben apartamientos de la característica ideal de transferencia que se traducen en nuevas fuentes de errores (citaremos sólo algunos de los más importantes)

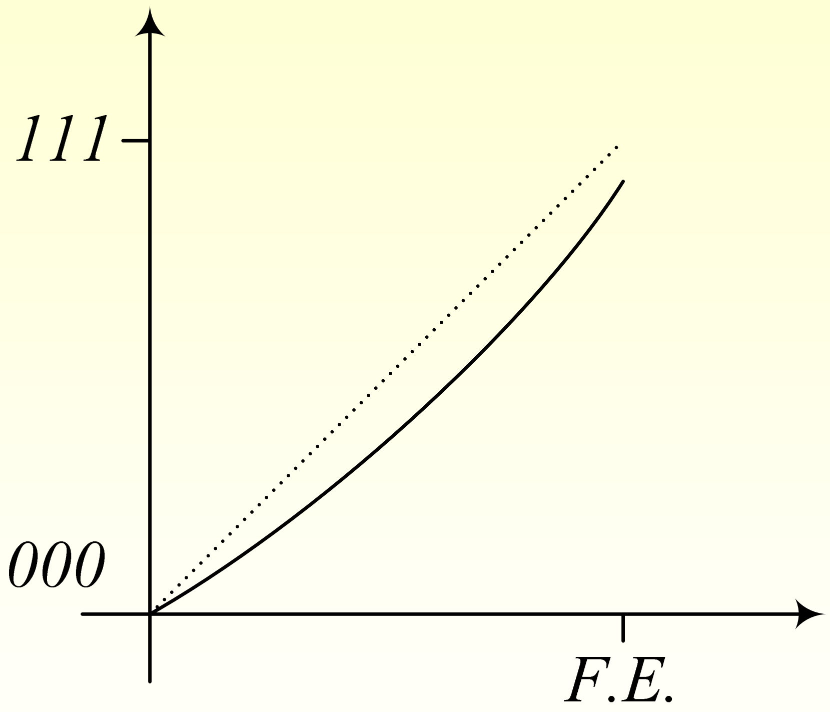


Falso Cero

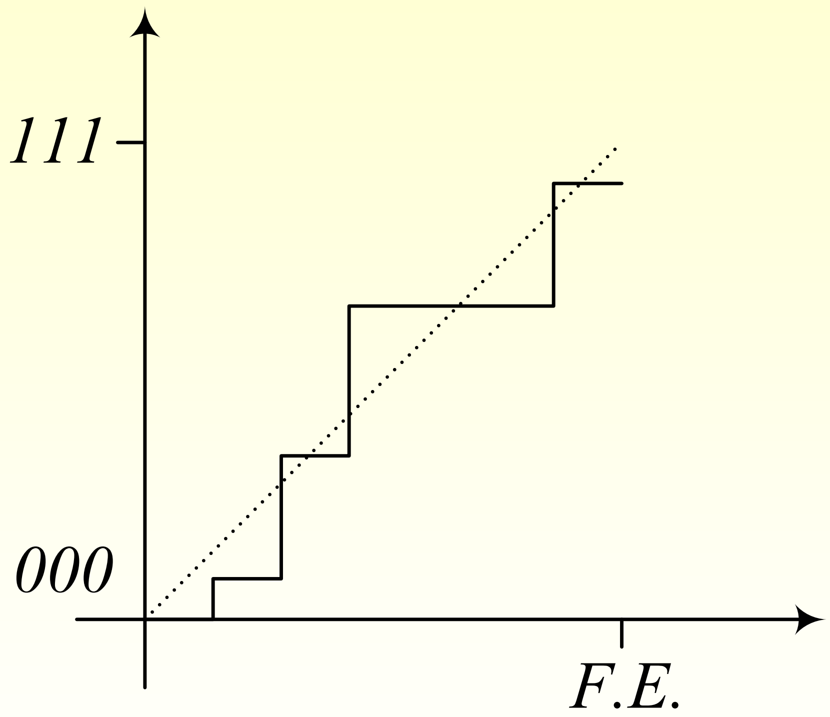


Error de Ganancia

Errores de Digitalización



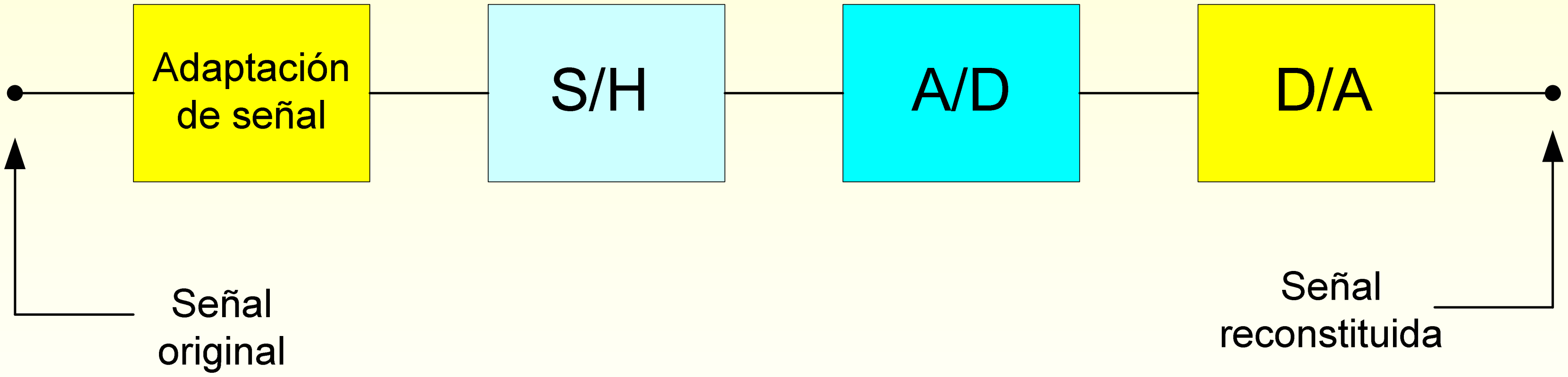
Error de Linealidad



Error de Conmutación

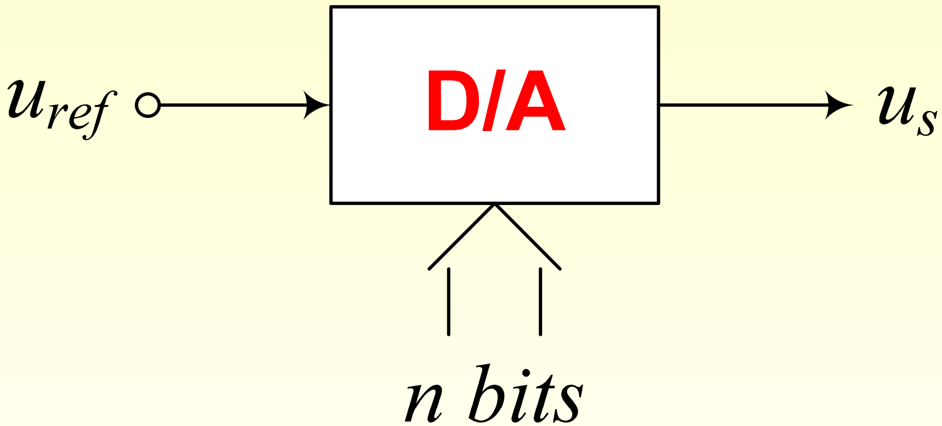
Conversión Digital - Analógica (D/A)

Una vez digitalizada la señal de entrada, muchas veces es necesario volver a convertirla en analógica para su uso posterior



El último bloque (D/A) es un conversor Digital - Analógico: su entrada es una señal digital y su salida una analógica.

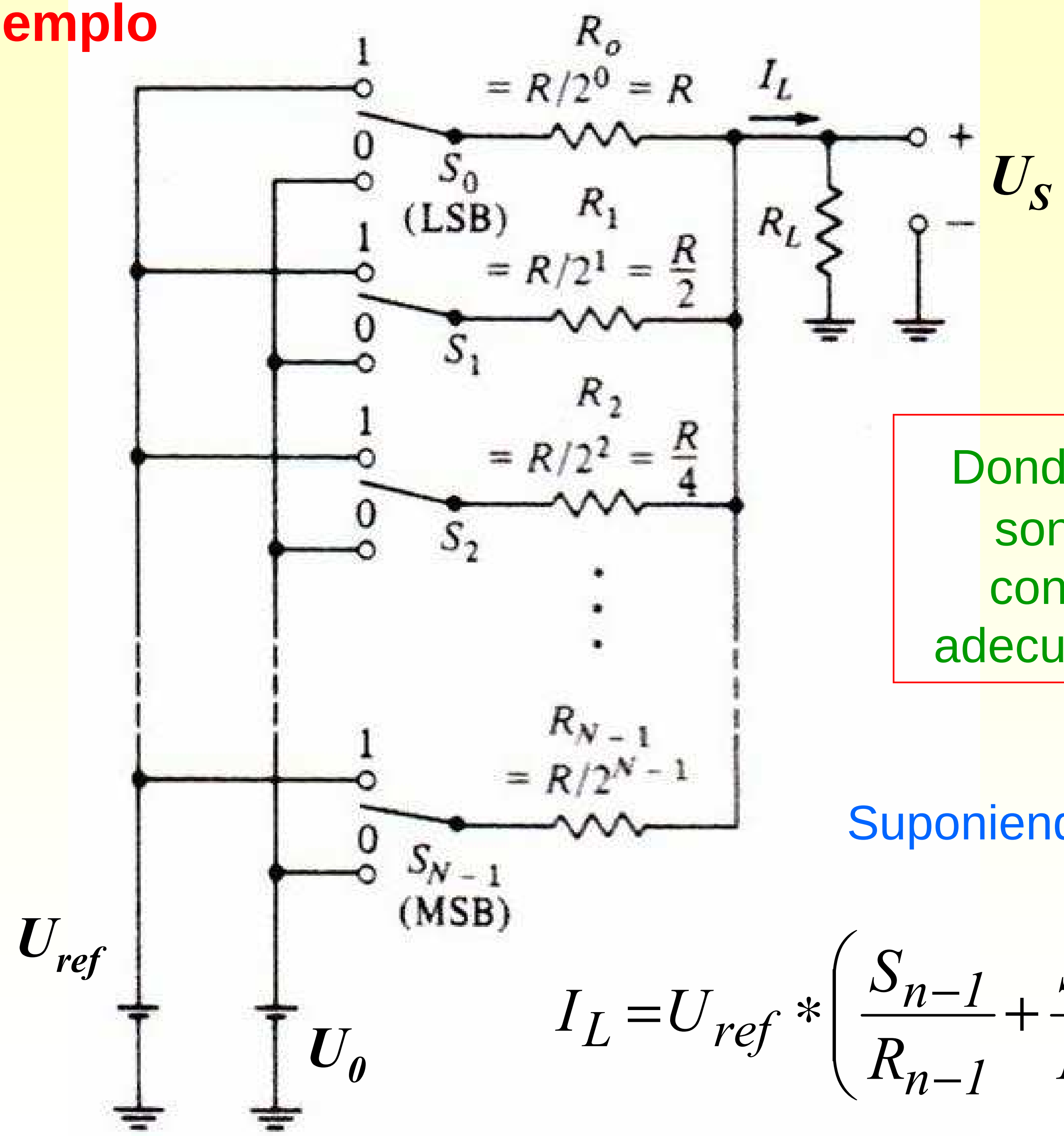
Introducción a los conversores D/A



Convierte una señal ***Digital*** de $\boldsymbol{n\ bits}$, en una ***Analógica*** a partir de una dada ***Tensión de Referencia***.

La señal $\boldsymbol{u_s}$ será una tensión cuyo valor dependerá de una cierta relación entre $\boldsymbol{u_{ref}}$ y la información contenida en la señal digital de $\boldsymbol{n\ bits}$.

Ejemplo



Donde U_{ref} y U_0 son tensiones conocidas con adecuada exactitud

Suponiendo $U_0 = 0$

$$I_L = U_{ref} * \left(\frac{S_{n-1}}{R_{n-1}} + \frac{S_{n-2}}{R_{n-2}} + \ldots + \frac{S_0}{R_0} \right)$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{U_{ref}}{R} * \left(S_{n-1}\,2^{n-1} + S_{n-2}\,2^{n-2} + \ldots + S_0\,2^0\right)$$

La corriente (analógica) guarda una relación directa con el estado de cada una de las llaves, que se corresponden con cada uno de los bits de la señal digital de entrada.

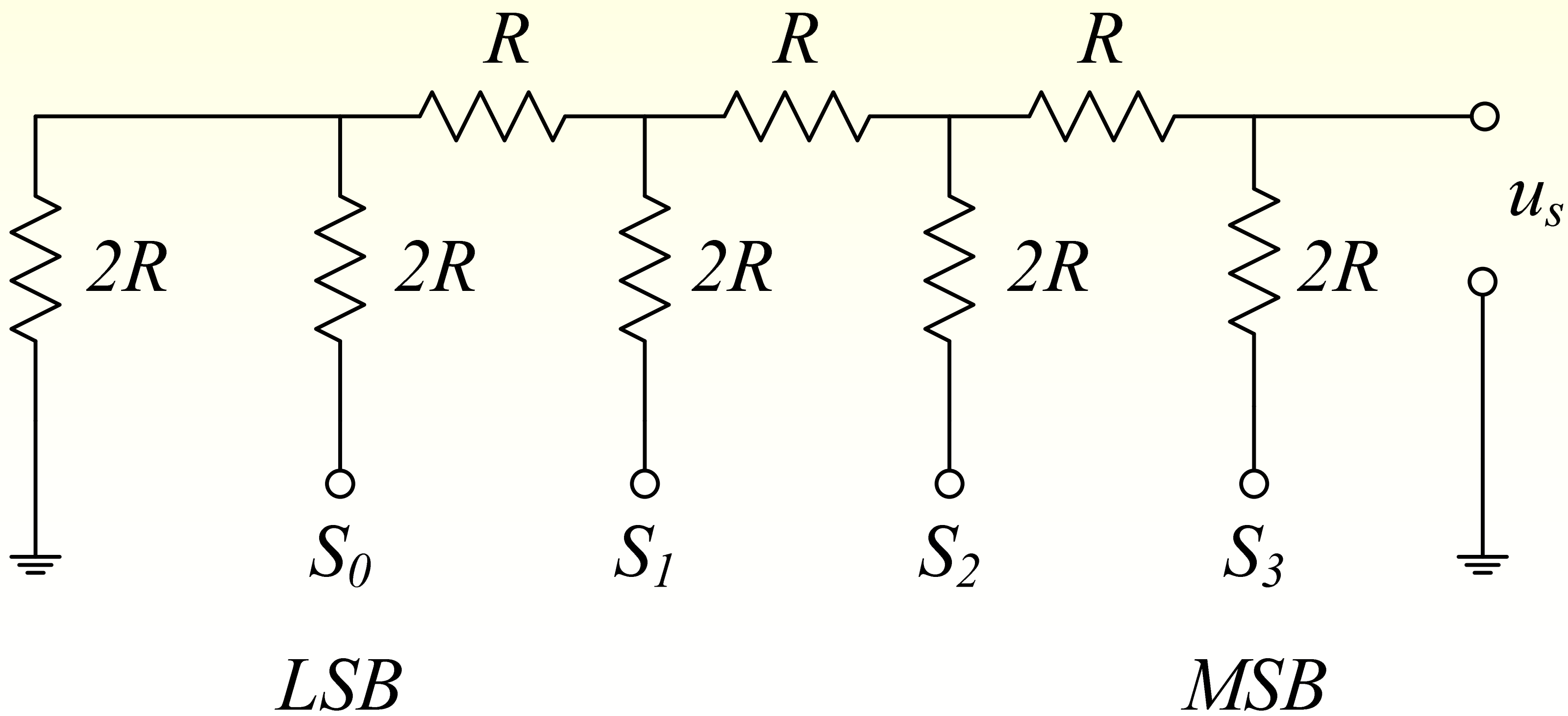
Inconveniente: si el Nº de bits aumenta, se hace difícil conseguir resistores estables y bien conocidos de valores que pueden llegar a ser muy altos.

Una posible solución:

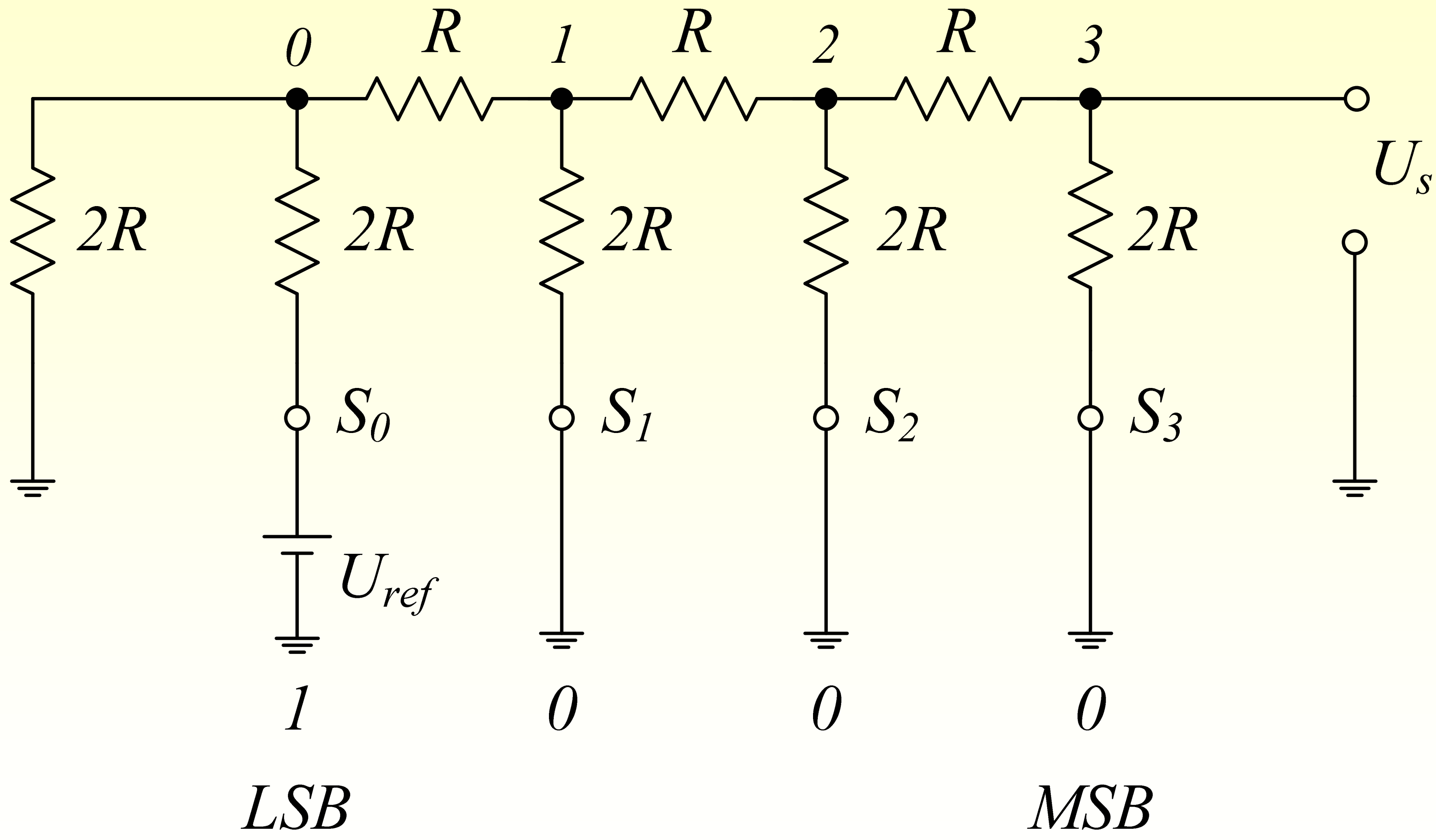
➔ **el conversor escalera "R-2R"**

(Requiere el doble de resistores que el anterior, pero de sólo dos valores, R y 2R)

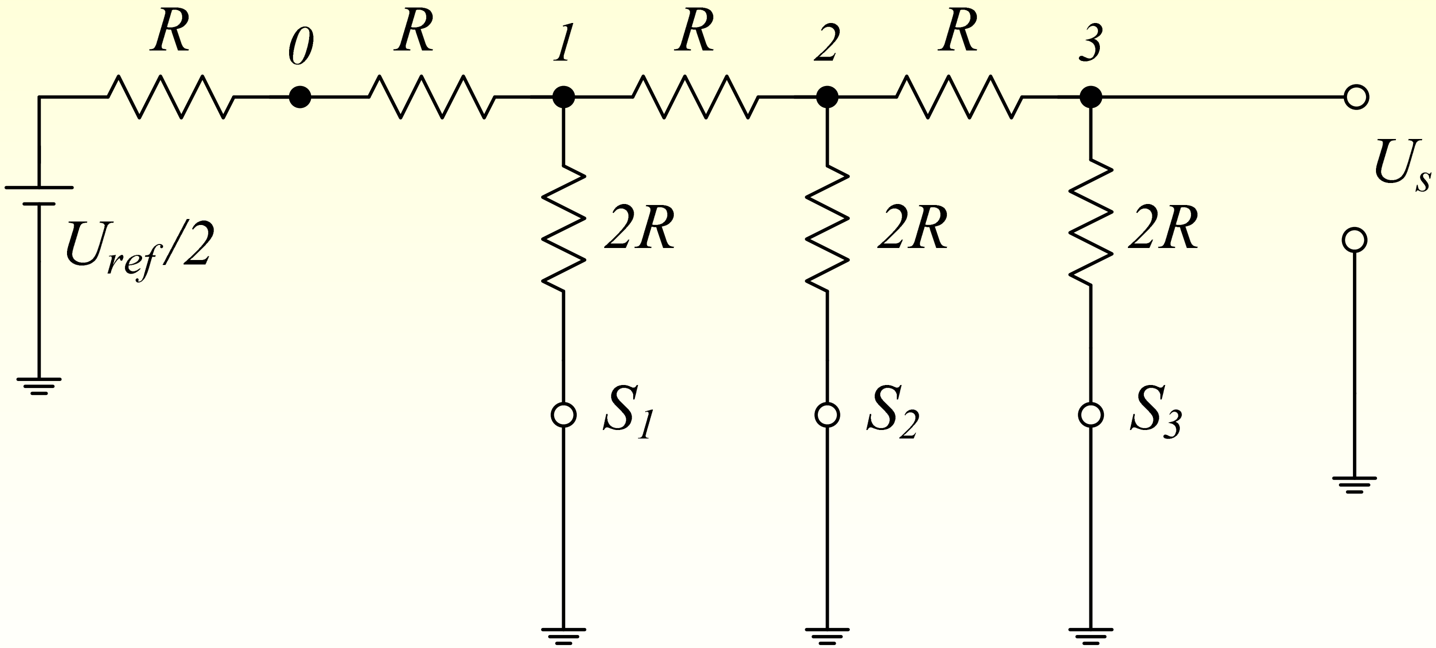
Esquema de un conversor D/A R-2R de 4 bits



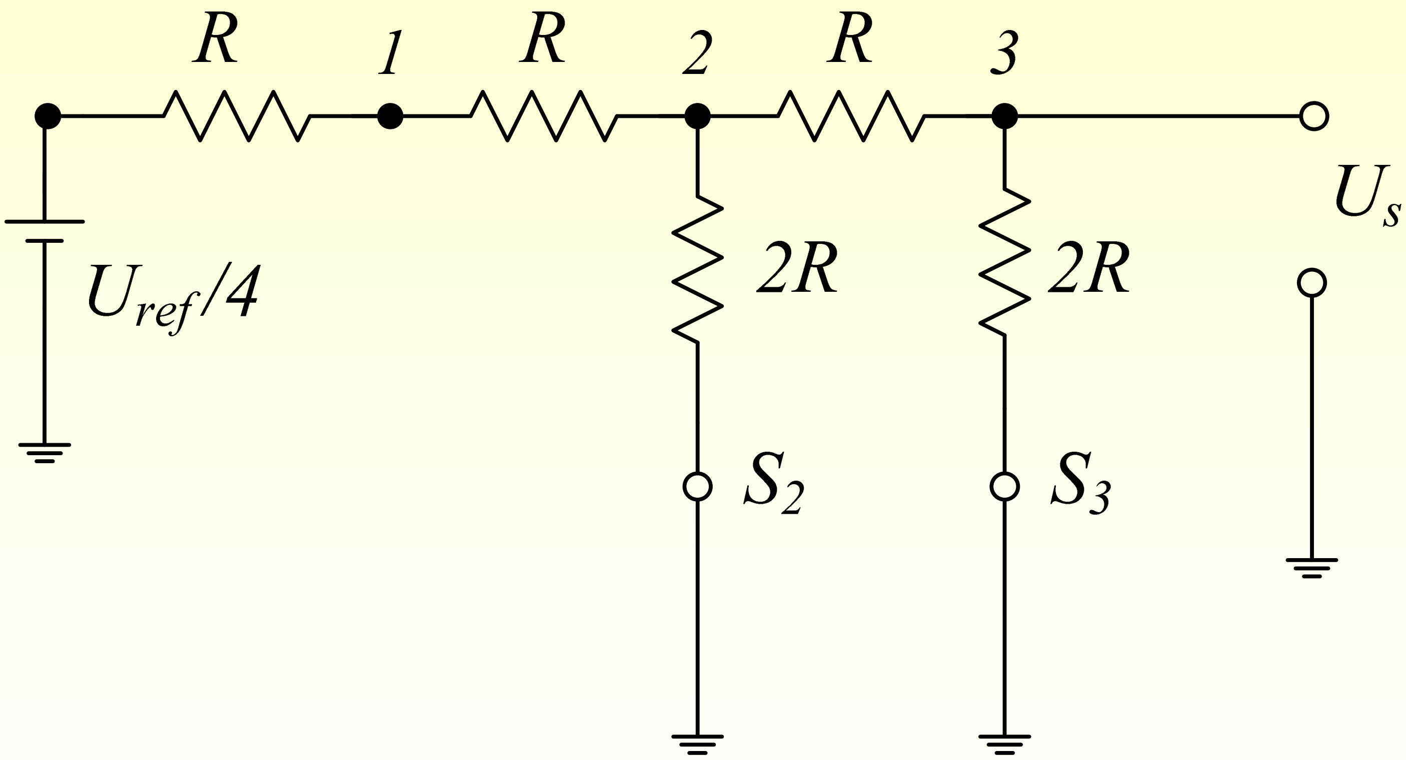
Ejemplo: **número binario 0001**



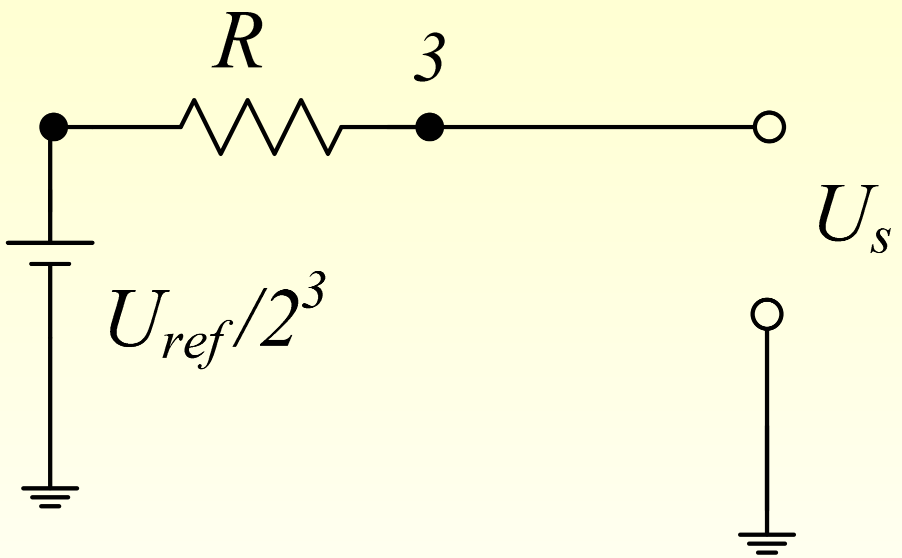
Haciendo el circuito equivalente de Thevenin “visto” desde *“0”* hacia la izquierda, tenemos:



Repitiendo el procedimiento para el punto *"1"* :



Siguiendo, el circuito equivalente “visto” desde el borne donde aparece *“U_S”* :



Cada llave contribuye a la salida total con su propio peso binario.

La expresión general de la tensión de salida puede escribirse:

$$U_s = U_{ref} * \left(\frac{S_0}{2^0} + \frac{S_1}{2^1} + \frac{S_2}{2^2} + \frac{S_3}{2^3} \right)$$

Con S_i de valor *“0”* o *“1”*